



Chemie Overal



Noordhoff Uitgevers

Chemie Overal

5 VWO

Vijfde editie

Auteurs

Joost Arends
Sjef Buil
Tom Heutmekers
Guus Rus
Juleke van Rhijn
Bertie Spillane
Yvonne Veldema
Hans Wouters

ICT

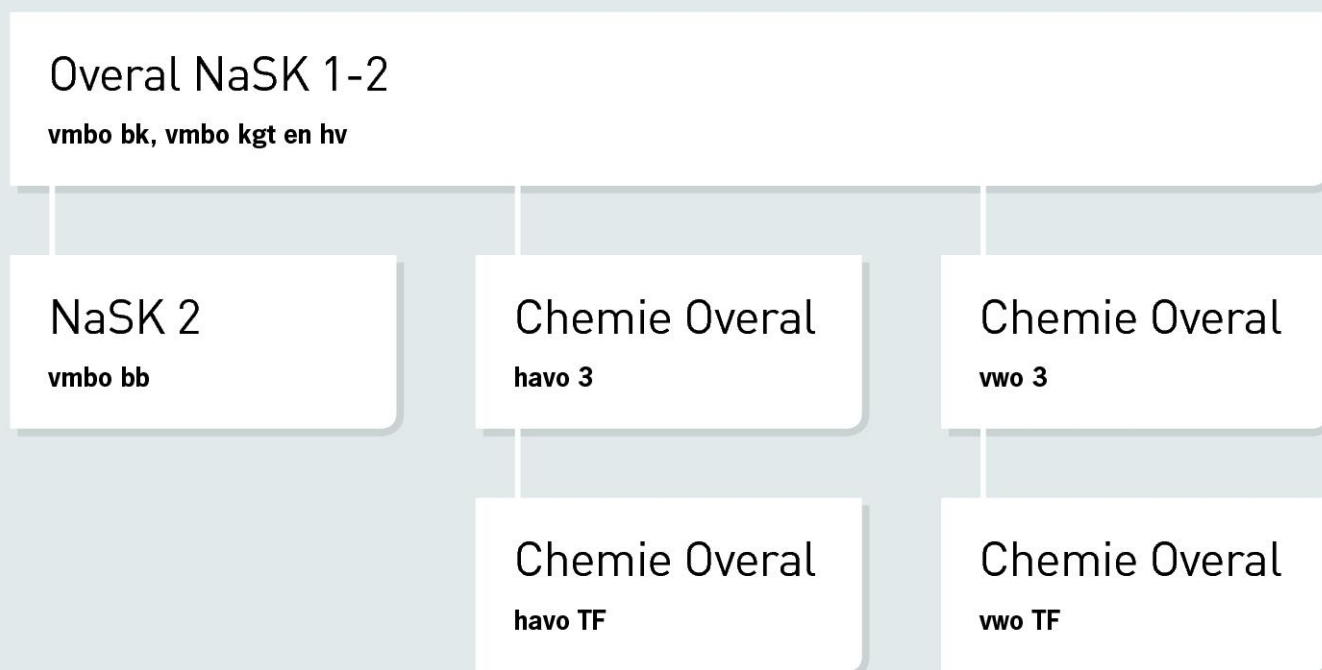
Randy Huijnen
Nico Kabel
Patrick van Kempen
Machteld Petram
Randy Huijnen

Eindredacteur

Juleke van Rhijn

Noordhoff Uitgevers

Serieoverzicht



Vormgeving binnenwerk: Bloemvis design en communicatie, Groningen

Vormgeving omslag: InOntwerp, Assen

Omslagbeeld: Shutterstock

Technisch tekenwerk: Integra Software Services, India



0 / 18

© 2018 Noordhoff Uitgevers bv, Groningen/Utrecht, The Netherlands

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van (een) gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.nl).

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without prior written permission of the publisher.

ISBN 978-90-01-81976-7

© Noordhoff Uitgevers bv

Voor de leerling

Welkom bij de 5^e editie van Chemie Overal voor de Tweede Fase. Voor elk leerjaar is er een leerboek, een uitwerkingenboek en Chemie Overal online.

Leerstof

De leerboeken bevatten de verplichte leerstof voor school-examen en centraal examen. Paragrafen of onderdelen van paragrafen die niet tot de examenstof behoren zijn met een ⊕-symbool aangegeven.

Opdrachten

In dit boek staat voor de opdrachten een A, B of C. Hieraan zie je wat het niveau is van de opdracht (zie de legenda hiernaast). Daarnaast zijn in het boek twee leerroutes aangegeven: een gemiddelde route aangegeven met het ⊙-symbool en een verdiepingsroute met het ★-symbool. Als je kiest voor een exacte studie, kun je de ★-route volgen. Je hoeft dan de vragen met het ⊙-symbool niet te maken. Volg je de gemiddelde route dan maak je alleen de vragen met het ⊙-symbool.

Experimenten

Aan het einde van een paragraaf staan korte omschrijvingen van de experimenten die je kunt doen. Van deze experimenten vind je online uitgebreide werkbladen.

Afsluiting

Het einde van ieder hoofdstuk bevat het onderdeel afsluiting. Deze bestaat uit contextrijke oefenopdrachten, een aantal keuzeopdrachten en een overzicht van de belangrijkste begrippen uit het hoofdstuk.

Online

Alle opdrachten en teksten uit dit boek vind je terug op Chemie Overal online. Hier vind je ook herhalingsopdrachten, filmpjes van experimenten, animaties, uitwerkingen en bij elk hoofdstuk een oefentoets. Wanneer je de opdrachten online maakt krijg je tips en feedback en worden automatisch de juiste opdrachten voor je klaargezet. Je kunt makkelijk je resultaten volgen. Als je de oefentoets online maakt, krijg je een studieadvies.

Veel plezier met Chemie Overal!

De auteurs

Legenda

- Verwijzing naar een experiment
- ⊕ Extra leerstof die niet tot de examenstof behoort
- A Kennisopdrachten
- B Eenvoudige toepassingsopdrachten
- C Complexere toepassingsopdrachten en inzichtopdrachten
- ⊙ Gemiddelde leerroute met vrijwel alle A- en B-opdrachten en een deel van de C-opdrachten
- ★ Verdiepende leerroute met een deel van de A- en B-opdrachten en de meeste C-opdrachten

Inhoud

8 Zuren 6

- 8.1** De pH van een oplossing 8
- 8.2** Zuren in water 13
- 8.3** Formules van zuren 19
- 8.4** pH-berekeningen 24

Afsluiting 32
Overzicht begrippen 37

9 Basen 38

- 9.1** Basen in water 40
- 9.2** Formules van basen 43
- 9.3** pH berekenen van basen 50
- 9.4** Zuur-basereacties 56
- 9.5** Zuur-basetitraties 62

Afsluiting 68
Overzicht begrippen 71

10 Analyse 72

- ⊕ **10.1** Spectroscopie 74
- ⊕ **10.2** Kwalitatieve analyse 79
- 10.3** Kwantitatieve analyse 85
- 10.4** Chromatografie 91
- 10.5** Massaspectrometrie 99

Afsluiting 107
Overzicht begrippen 113

11 Redoxreacties 114

- 11.1** Elektronenoverdracht 116
- 11.2** Redoxkoppels 123
- 11.3** Redoxreacties in oplossing 130
- 11.4** Toepassingen 137

Afsluiting 144
Overzicht begrippen 149

12 Molecuulbouw 150

- 12.1** Lewisstructuren 152
- 12.2** VSEPR-theorie 160
- 12.3** Mesomerie 166
- 12.4** Reactiemechanismen 171
- 12.5** Stereo-isomerie 178

Afsluiting 185
Overzicht begrippen 191

13 Kunststoffen 192

- 13.1** Additiepolymerisatie 194
- 13.2** Condensatiepolymerisatie 199
- 13.3** Eigenschappen 207

Afsluiting 215
Overzicht begrippen 219

14 Nieuwe materialen 220

- 14.1** Metalen en legeringen 222
- 14.2** Slimme polymeren 230
- 14.3** Keramische materialen 237
- 14.4** Nanotechnologie 244

Afsluiting 249
Overzicht begrippen 255

15 Groene chemie 256

- 15.1** Atoomeconomie 258
- 15.2** Energiebalans 265
- 15.3** Reactiesnelheid 271
- 15.4** Blokschema's 277
- 15.5** Welk proces is groener? 283

Afsluiting 289
Overzicht begrippen 295

Register 296
Verantwoording 298

8 Zuren

Inhoud

- 8.1** De pH van een oplossing
Experimenten:
 - 8.1 De zuurgraad van oplossingen
 - 8.2 Druppelplaatexperiment
- 8.2** Zuren in water
Experimenten:
 - 8.3 Geleidingsvermogen van zure oplossingen
 - 8.4 Elektrolyse van zure oplossingen
 - 8.5 Geleidingsvermogen van verdunde oplossingen
- 8.3** Formules van zuren
- 8.4** pH-berekeningen
Experiment:
 - 8.6 Zwak of sterk?
- Afsluiting
- Overzicht begrippen



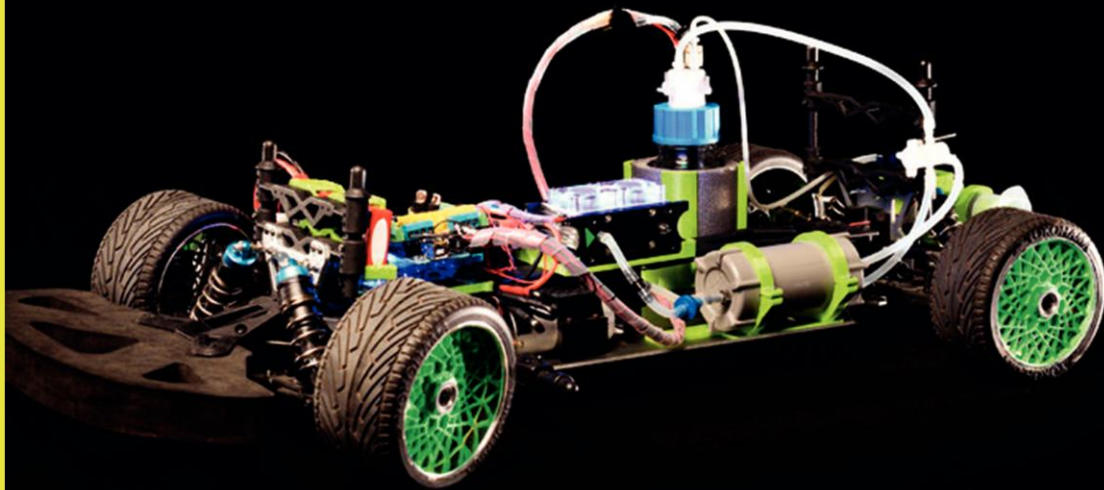
Melkzuur

Winnaar van de Giro d'Italia 2017, Tom Dumoulin, tijdens zijn laatste winnende tijdrit. Bij zo'n zware inspanning ontstaan in de spieren reactieproducten zoals melkzuur, die zorgen voor de pijnlijke 'verzuring' van je spieren.



Zuren

Zuren zijn verbindingen die in de natuur voorkomen, maar ook in de industrie worden gemaakt. In het schaalmodel van de auto hiernaast gebruikt de TU Eindhoven mierenzuur als brandstof. Dit is een klimaatvriendelijk alternatief voor fossiele brandstoffen.



Je leert

- wat de pH van een oplossing is;
- hoe je de pH van een oplossing kunt meten.

8.1 De pH van een oplossing



8.1 De kleuren van rodekoolsap bij verschillende pH-waarden

Zuur, basisch of neutraal

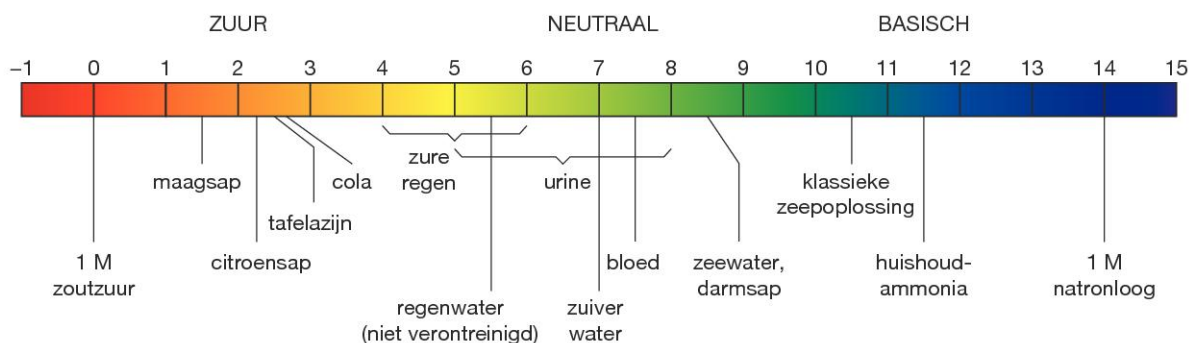
Smaak is een stoffeigenschap en één van de vijf bestaande smaken noem je zuur. Yoghurt, tafelazijn en citroensap smaken zuur, dat komt doordat deze producten zuren bevatten. Yoghurt bevat melkzuur, tafelazijn azijnzuur en citroenen bevatten citroenzuur. Als een oplossing een klein beetje zuur bevat, geeft dat een frisse smaak.

Een oplossing kan **zuur**, **basisch** of **neutraal** zijn. Om het verschil in **zuurgraad** in een getalwaarde te kunnen weergeven, gebruik je de pH. Als de pH lager is dan 7, is de oplossing zuur. Hoe lager de pH, hoe zuurder de oplossing. Als de pH hoger is dan 7, dan is de oplossing basisch. Hoe hoger de pH, hoe basischer de oplossing. Als de pH gelijk is aan 7, is de oplossing neutraal.

Als je wilt weten of een oplossing een zuur bevat, zou je de oplossing kunnen proeven. Maar in veel gevallen loop je daarbij het risico dat je je mond beschadigt of dat je zelfs wordt vergiftigd. Je kunt die oplossing dus beter op een andere manier onderzoeken. Je gebruikt daarvoor stoffen die in een zure oplossing een andere kleur hebben dan in een oplossing die niet zuur is. Deze stoffen zijn **indicatoren**, de kleurstof in rodekool is een voorbeeld van zo'n indicator. In veel recepten voor het bereiden van rodekool worden appels gebruikt. In appels zit de stof appelzuur en daardoor zorgen appels voor een verlaging van de pH en geven de rodekool een rode kleur. Als je rodekool hebt gegeten en je wast je bord af, dan wordt de rodekool groenblauw. De zeep zorgt voor een verhoging van de pH en een verandering van de kleur, zie figuur 8.1.

Vaak ligt de pH tussen de 0 en de 14, maar het is ook mogelijk om een oplossing te hebben met een pH onder de 0, bijvoorbeeld -1 . Deze oplossing is dan heel zuur. Ook kan een oplossing een pH van boven de 14 hebben.

In figuur 8.2 is een pH-schaal afgebeeld en daarbij is de zuurgraad van een aantal veelvoorkomende oplossingen aangegeven.



8.2 De pH-waarden van een aantal oplossingen bij kamertemperatuur

- Experiment 8.1
- Experiment 8.2

Indicatoren

Naast rodekoolsap zijn er nog meer zuur-base-indicatoren, zoals je hieronder ziet.

Lakmoes

Lakmoespapier is papier waarop de stof **lakmoes** is aangebracht. Het komt voor in twee kleuren: rood en blauw. De kleur van lakmoes hangt af van de zuurgraad. In een zure oplossing kleurt het blauwe lakmoespapier rood, in een basische oplossing kleurt het rode lakmoespapier blauw. In een neutrale oplossing behouden rood en blauw lakmoespapier hun oorspronkelijke kleur. Je kunt de pH met lakmoespapier niet nauwkeurig bepalen.

Universeel indicator

Om nauwkeuriger de pH van een oplossing te bepalen, gebruik je **universeel indicatorpapier**. Dat is papier waarop een mengsel van verschillende indicatoren is aangebracht, die afhankelijk van de pH-waarde samen een continu verlopende kleurenreeks vertonen. Deze kleuren met bijbehorende pH-waarden staan op het doosje afgebeeld.

Oplossingen

Er zijn ook oplossingen van kleurstoffen die bruikbaar zijn als indicator. Een overzicht van een aantal van deze stoffen vind je in Binas tabel 52A. Je ziet in die tabel dat een oplossing van de stof methylrood bij een $pH < 4,8$ rood kleurt en bij een $pH > 6,0$ geel kleurt. Het pH-gebied waarin de indicator van kleur verandert, noem je het **omslagtraject**. In dit geval loopt dit van pH 4,8 tot 6,0. In dit gebied geeft de indicator de oplossing een mengkleur. Bij methylrood kleurt de oplossing dan oranje, zie figuur 8.3.

Als je gebruikmaakt van meerdere indicatoroplossingen kun je vrij precies achterhalen wat de pH van een oplossing is.



8.3 Een oplossing van de indicator methylrood

Bekerglas 1: $pH < 4,8$

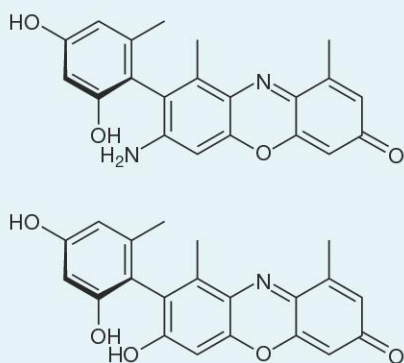
Bekerglas 2: $4,8 < pH < 6,0$

Bekerglas 3: $pH > 6,0$

Is dit contextkader lakmoesproef?

Een van de oudste indicatoren is lakmoes. Van lakmoes wordt een oplossing gemaakt en daar wordt papier in gedrenkt. Na drogen wordt het papier in twee kleine boekjes met afscheurbare velletjes verkocht, een blauw en een rood. Met blauw lakmoespapier toon je zure oplossingen aan en met rood lakmoespapier toon je basische oplossingen aan. Maar wat is dat lakmoes dan?

Lakmoes is een stof die uit korstmossen wordt gemaakt. Een van die korstmossen is *Roccella fuciformis*, waarvan je in figuur 8.4b een foto ziet. Vroeger werden de korstmossen fijngestampt en door de ontstane pap te laten gisten met menselijke urine en daarna uit te laten lekken werd het lakmoes verkregen. Tegenwoordig worden de korstmossen geëxtraheerd. Lakmoes, een stof die vroeger als verfstof werd gebruikt, is geen zuivere stof, maar een mengsel van wel vijftien verschillende kleurstoffen. Die stoffen lijken wat structuurformule betreft erg op elkaar. In figuur 8.4a zie je de structuurformule van twee van de vijftien stoffen staan.



8.4a De structuur van twee van de stoffen die deel uitmaken van lakmoes



8.4b Het korstmos *Roccella fuciformis* gevonden op Flores van de Azoren. Het groeit op een droge rotswand en is ongeveer 6 cm lang.

Nederland is heel lang het centrum geweest van de fabricage van lakmoes. In Noord-Holland en Utrecht stonden lakmoesfabrieken waar Schotse korstmossen werden gebruikt. De vierde Engelse oorlog (1780-1784) maakte een einde aan de aanvoer van Schots mos en dat was tevens het einde van de lakmoesbereiding in Nederland. De naam lakmoes komt uit het Middelnederlands en het Nederlandse woord werd dan ook in andere talen overgenomen. Zo heet het in het Duits en het Zweeds *lackmus*.

Het woord lakmoes kreeg als term 'lakmoesproef' nog een andere betekenis in de Nederlandse taal. Een lakmoesproef is een test die aangeeft of iets écht deugt. Als je twijfelt aan bijvoorbeeld de kwaliteit of het belang van iets. Als je denkt dat de informatie in dit kader niet helemaal juist is, kun je je afvragen 'Is dit contextkader wel lakmoesproef?'

Bron: Wikipedia en Onzetaal.nl

● Opdracht B6

Samenvatting

- Een indicator is een stof waarmee je kunt bepalen of een oplossing zuur of basisch is.
- Een oplossing is zuur bij een $\text{pH} < 7$, basisch bij een $\text{pH} > 7$ en neutraal bij $\text{pH} = 7$.
- De indicator lakmoes geeft alleen aan of een oplossing zuur of basisch is.
- Met universeel indicatorpapier kun je de pH-waarde van een oplossing vaststellen.
- In Binas tabel 52A zijn een aantal indicatoren te vinden met het bijbehorende omslagtraject.

Opdrachten

A 1

- a Op welke drie manieren kun je de pH van een oplossing bepalen?
- b Leg uit wat wordt verstaan onder het omslagtraject van een indicator. Zie Binas tabel 52A.

B 2

Natriumsulfiet wordt gebruikt als conserveringsmiddel voor fruit en vlees. Het zorgt er onder andere voor dat het vlees mooi rood blijft. Ook in wijn komt sulfiet voor om bacteriën te doden en om de gisting te stoppen. Jan onderzoekt een oplossing van natriumsulfiet. Hij gebruikt twee indicatoren. Hij verdeelt de natriumsulfietoplossing over twee reageerbuisen. Aan de ene reageerbuis voegt hij wat kresolrood toe. Aan de andere reageerbuis voegt hij wat thymolftaleïne toe.

Hij kijkt naar de kleuren van de oplossingen en vervolgens naar Binas tabel 52A. Uit zijn waarnemingen trekt Jan de conclusie dat de pH van de oplossing ongeveer 9 is.

- a Wat is de kleur van een natriumsulfietoplossing?
- b Leg uit wat de kleur is van de oplossing in de buis met kresolrood.
- c Welke kleur heeft de oplossing in de buis met thymolftaleïne?

B 3

Een leerling bepaalt de pH van een oplossing met behulp van twee zuur-base-indicatoren: broomthymolblauw en congorood. Als hij broomthymolblauw toevoegt, wordt de oplossing geel en met congorood wordt de kleur oranje-rood. Leg uit tussen welke grenzen de pH van de oplossing ligt.

B 4

- a Leg uit of de pH van een zure oplossing groter of kleiner wordt als je de oplossing verdunt met water.
- b Leg ook uit of de pH van een basische oplossing groter of kleiner wordt bij verdunning.
- c Aan 100 L water voeg je een druppeltje van een zure oplossing toe. Leg uit of de pH van het water zal veranderen.

B 5

Hortensia's zijn heel populaire bloemen in de tuin. De bloemen kunnen verschillende kleuren hebben, zie figuur 8.5. De kleur hangt af van de pH van de bodem. Als de pH

onder de 5 ligt, dan kleuren de bloemen blauw. Als de pH boven de 6,5 ligt, kleuren de bloemen rood.

In een kwekerij worden hortensia's in kuipen gekweekt. De kweker kan rode of blauwe bloemen aan de hortensia's krijgen door de zuurgraad van de grond in de kuip te regelen. De familie Verweij heeft bij de kwekerij een kuip met een hortensia met rode bloemen gekocht. Bij droog weer krijgt de hortensia water uit de regenton.

Na twee jaar geeft de hortensia geen rode bloemen meer. Vrijwel alle bloemen zijn blauw. De familie Verweij wil weer rode bloemen.

- a Leg uit of het water uit de regenton zuur of basisch is.

De kweker raadt aan om de hortensia geen regenwater meer te geven, maar een mengsel van calciumhydroxide en water. De bloemen worden na verloop van tijd weer rood.

- b Leg uit of het gegeven mengsel een zuur of een base is.



8.5 Een hortensia groeit blauw op bij een pH van 4,5.

B 6

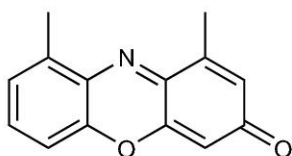
Lees de tekst in het kader 'Is dit contextkader lakmoesproef?' en beantwoord de volgende vragen.

Met lakmoespapier kun je bepalen of een oplossing zuur of basisch is.

- a Leg uit of lakmoes een nauwkeurige indicator is.
- b Leg uit hoe je lakmoespapier maakt.

Lakmoes bestaat uit wel vijftien verschillende stoffen die vrijwel allemaal tot een groep stoffen behoren die een bepaald gedeelte in hun structuurformule hetzelfde hebben.

Van twee van deze stoffen staat de structuurformule gegeven. Het gedeelte in de structuurformule, de chromofoor, dat voor de kleuring zorgt staat hieronder.



8.6

- c Geef de molecuulformule van de chromofoor. Zie zo nodig de hint in het uitwerkingenboek.
- d Waarin verschillen de twee formules in figuur 8.4a van elkaar?
- e Leg uit of de indicatoren in rood en blauw lakmoespapier twee verschillende stoffen zijn, of dat het dezelfde stof is.

B 7

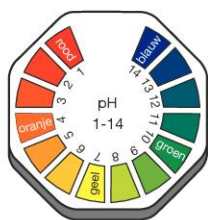
De Airbus

De Airbus A380 is op dit moment het grootste passagiersvliegtuig ter wereld. Bij de productie ervan worden nieuwe materialen toegepast zoals 'glare', een combinatie van aluminium en kunststof.

Voordat aluminium wordt verwerkt in glare, wordt het met een oplossing van chroomzuur behandeld. Deze oplossing is extreem zuur, oxiderend en corrosief. Door de behandeling ontstaat op het aluminium een laagje aluminiumoxide van 5 micrometer dik. Dit laagje zorgt er onder meer voor dat het materiaal beter bestand is tegen corrosie.

In figuur 8.7 zijn de kleuren van universeel indicatorpapier weergegeven afhankelijk van de pH.

- a Welke kleur krijgt het indicatorpapier wanneer er een druppel chroomzuuroplossing op wordt gedaan?
- A blauw
- B geel
- C groen
- D rood



8.7

Je kunt nu

- uitleggen hoe je de zuurgraad van een oplossing aangeeft;
- uitleggen hoe je kunt vaststellen of een oplossing zuur, basisch of neutraal is;
- de omslagtrajecten van indicatoren opzoeken en gebruiken om de pH te bepalen.

Hieronder zijn enkele pictogrammen weergegeven. Twee hiervan staan op een voorraadvat met een oplossing van chroomzuur.

b Geef de nummers van deze twee pictogrammen.



8.8

Chroomzuur, dat ook gebruikt wordt in laboratoria om glaswerk schoon te maken, is nog niet zo eenvoudig te maken. Uit een oplossing van kaliumdichroomaat en zwavelzuur wordt het dichroomzuur, $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ gemaakt. Dit reageert in een evenwichtsreactie verder tot chroomzuur en chroomoxide, CrO_3 . Uit 1 mol dichroomzuur ontstaat 1 mol chroomzuur en 1 mol CrO_3 .

- c Leid met behulp van de reactievergelijking de formule van chroomzuur af.

Experimenten

8.1 De zuurgraad van oplossingen

In dit experiment bepaal je de zuurgraad van tien verschillende vloeistoffen. Je maakt gebruik van rood en blauw lakmoespapier, universeel indicatorpapier en rodekoolsap.

8.2 Druppelplaatexperiment

In dit experiment onderzoek je waar het omslagtraject van een indicator ligt en hoe hoog de pH van een onbekende oplossing is.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Rio Tinto

Langs de Spaanse rivier de Rio Tinto winnen mijnbouwbedrijven metalen als goud, zilver en koper. Het lozen van zuur afvalwater door deze bedrijven heeft ervoor gezorgd dat het water van de Rio Tinto een pH heeft van ongeveer 2.

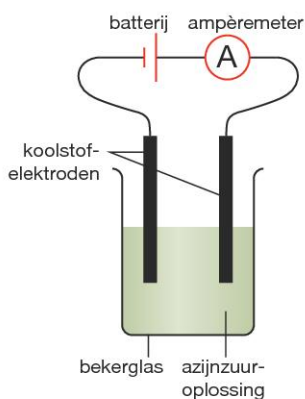
**Je leert**

- hoe het oplossen van zuren in water verloopt;
- het verschil tussen een sterk en een zwak zuur.

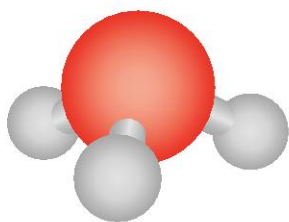
8.2 Zuren in water

- Experiment 8.3

- Experiment 8.4



8.9 Stroomgeleiding meten



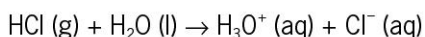
8.10 Model van het oxoniumion

Stroomgeleiding zure oplossingen

Als je wilt weten welke deeltjes verantwoordelijk zijn voor de lage pH van de Rio Tinto kun je stroomgeleiding gebruiken. Met stroomgeleiding onderzoek je op macroniveau of er geladen deeltjes in de zure oplossingen aanwezig zijn. De stroomgeleiding van een oplossing meet je met de opstelling in figuur 8.9.

Experiment 8.3 laat zien dat zuiver azijnzuur geen stroom geleidt. Dat klopt, want azijnzuur is een moleculaire stof en bevat geen geladen deeltjes. Na het toevoegen van water aan azijnzuur blijkt de oplossing van azijnzuur wel stroom te geleiden. Het mengsel van water en azijnzuur bevat kennelijk geladen deeltjes. Zoutzuur, de triviale naam voor een oplossing van waterstofchloride, geleidt eveneens elektrische stroom, terwijl waterstofchloride ook een moleculaire stof is.

Als je naar het microniveau kijkt, zie je dat het geleiden van stroom wordt veroorzaakt door het ontstaan van ionen bij het oplossen van azijnzuur en waterstofchloride, de zuren reageren met water. Het zuur geeft een H^+ -ion af aan een watermolecuul. Hierbij ontstaan H_3O^+ -ionen, een H_3O^+ -ion heet een **oxoniumion** (zie figuur 8.10). De reactievergelijking van de reactie tussen waterstofchloride en water is:



Dat er inderdaad waterstofionen ontstaan, kun je afleiden uit experiment 8.4. Als je door de oplossing van waterstofchloride geruime tijd stroom leidt, zie je aan de negatieve elektrode een gas ontstaan. Dit gas is waterstofgas dat is gevormd uit waterstofionen die aan de negatieve elektrode een elektron hebben opgenomen. Zure oplossingen bevatten dus waterstofionen gekoppeld aan watermoleculen.

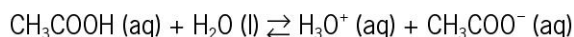
● Experiment 8.5

Verschillen in stroomgeleiding van zure oplossingen

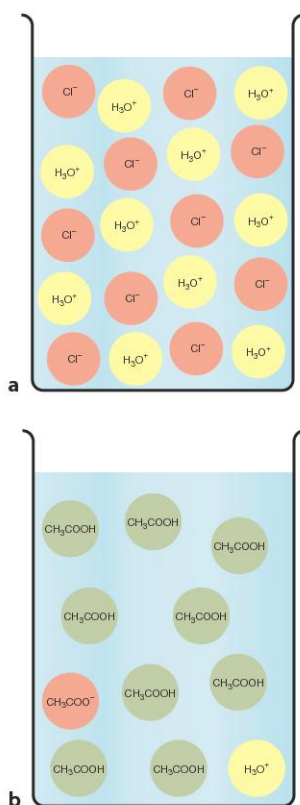
In experiment 8.5 onderzoek je of de stroomgeleiding verandert bij oplossingen van verschillende molariteit. In figuur 8.12a zie je de resultaten van het meten van de geleidbaarheid van waterstofchlorideoplossingen van 0,10 M, 0,050 M en 0,025 M. Je ziet dat er een lineair verband is tussen de molariteit van de oplossing en de geleidbaarheid. Als je de oplossing tweemaal verdunt, dan halveert de geleidbaarheid. Dat klopt, want de concentratie van de H_3O^+ - en Cl^- -ionen wordt twee keer zo klein.

In figuur 8.12b zie je de resultaten van het meten van de geleidbaarheid van azijnzuuroplossingen van 0,10 M, 0,050 M en 0,025 M. Het eerste wat opvalt, is dat de geleidbaarheid van een azijnzuuroplossing veel lager ligt dan die van een waterstofchlorideoplossing. Zowel azijnzuur als waterstofchloride is een zuur dat per molecuul één H^+ -ion kan afgeven. Blijkbaar geeft een mol azijnzuur in water minder H^+ -ionen af dan een mol waterstofchloride.

Daarnaast kun je zien dat er hier geen lineair verband is. Bij een tweemaal zo grote molariteit van de oplossing is het geleidingsvermogen niet tweemaal zo groot. Blijkbaar zijn er bij oplossingen met een grotere molariteit minder ionen in de oplossing dan mogelijk is. Dit is te verklaren door aan te nemen dat de reactie van azijnzuur met water geen aflopende reactie is, maar een evenwichtsreactie:

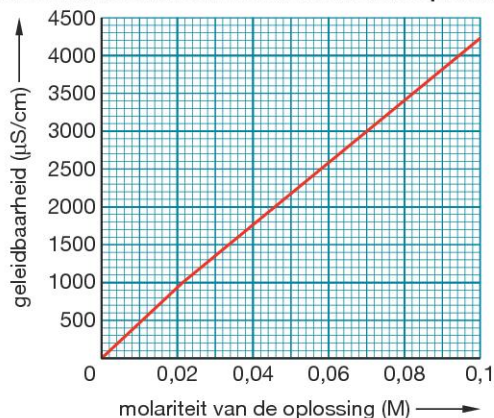


Er zijn zuren die net als waterstofchloride volledig splitsen in ionen, dit zijn **sterke zuren**. Zuren die net als azijnzuur niet volledig splitsen in ionen, noem je **zwakke zuren**. In figuur 8.11 zie je een modelvoorstelling van de oplossing van een sterk en een zwak zuur.



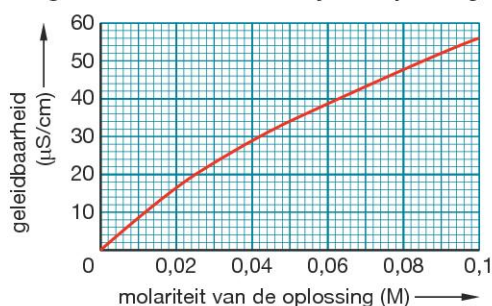
8.11 Een modelvoorstelling van de oplossing van een sterk zuur (a) en een zwak zuur (b)

geleidbaarheid van een waterstofchloride-oplossing



8.12a De geleidbaarheid van waterstofchlorideoplossingen

geleidbaarheid van een azijnzuuroplossing



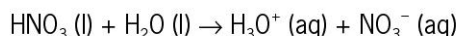
8.12b De geleidbaarheid van azijnzuuroplossingen



8.13 Bittere amandelen bevatten blauwzuur, de triviale naam van waterstofcyanide. Als je tien bittere amandelen eet, kan dat al dodelijk zijn.

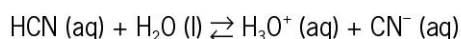
Notaties van zure oplossingen

Salpeterzuur (HNO_3) is een sterk zuur en er is dan sprake van een aflopende reactie met water:



In de oplossing zijn geen opgeloste HNO_3 -moleculen meer aanwezig, er zijn uitsluitend watermoleculen, H_3O^+ -ionen en NO_3^- -ionen. De notatie voor een oplossing van salpeterzuur is niet $\text{HNO}_3 (\text{aq})$, maar $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{NO}_3^- (\text{aq})$. Voor de pijl schrijf je geen $\text{HNO}_3 (\text{aq})$, maar $\text{HNO}_3 (\text{l})$.

Waterstofcyanide (HCN) is een zwak zuur en er is dan sprake van een evenwichtsreactie met water:



In de oplossing bevinden zich opgeloste HCN -moleculen, watermoleculen, H_3O^+ -ionen en CN^- -ionen. In verhouding zijn er meer HCN -moleculen dan ionen. De notatie voor een oplossing van waterstofcyanide is $\text{HCN} (\text{aq})$ en voor de pijl schrijf je dus $\text{HCN} (\text{aq})$.

Zuur aardgas

Aardgas bevat de stof diwaterstofsulfide, H_2S , een zeer giftig gas dat naar rotte eieren ruikt. Bij verbranding wordt zwaveldioxide gevormd en dat is weer een belangrijke luchtvervuiler. Het diwaterstofsulfide is een zwak zuur en het aardgas wordt wel 'zuur' aardgas genoemd. Om aardgas veilig te gebruiken bij bijvoorbeeld koken moet het H_2S verwijderd worden in een gasontzwavelingsinstallatie. In Nederland doet de NAM dat in Emmen. Met een speciale oplossing wordt het H_2S uit de aardgasstroom gewassen. Het verwijderde H_2S wordt dan in het zogenaamde clausproces omgezet in zwavel en water.

De zuivere zwavel is een belangrijke grondstof voor de chemische industrie. Ongeveer 80% van de zwavel wordt gebruikt om zwavelzuur mee te maken. Zwavelzuur behoort tot een van de meest geproduceerde verbindingen ter wereld.

Hoewel het een gevaarlijke, sterk corrosieve stof is, is zwavelzuur onmisbaar voor bijvoorbeeld de productie van kunstmest, als accuzuur, als katalysator en bij het reinigen van ertsen.

Bron: *Chemische Feitelijkheden*



8.14 Aardgas mag geen diwaterstofsulfide bevatten.

● Opdracht B14

Samenvatting

- Als een zuur oplost in water worden H^+ -ionen afgegeven aan watermoleculen. Het gevormde ion heet oxoniumion.
- Een sterk zuur is een zuur dat in water volledig splitst in ionen.
- Een zwak zuur is een zuur dat in water gedeeltelijk splitst in ionen, dit is een evenwichtsreactie.
- Een oplossing van een sterk zuur HZ noteer je als de ionen in de oplossing: $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{Z}^- (\text{aq})$.
- Een oplossing van een zwak zuur HZ noteer je als het zuur zelf: $\text{HZ} (\text{aq})$.

Opdrachten

A 8

- a Geef de formules van de stoffen waterstofjodide, methanol en kaliumjodide.
- b Uit welk soort deeltjes bestaat elk van de drie genoemde stoffen?

Waterstofjodide is een zuur.

- c Waarom geleidt een oplossing van methanol geen elektrische stroom?
- d Geef aan waarom een oplossing van kaliumjodide wel elektrische stroom geleidt.
- e Geef met de deeltjes van het microniveau aan waarom een oplossing van de moleculaire stof waterstofjodide toch elektrische stroom kan geleiden.

A 9

Leg uit waarom een oplossing van een sterk zuur beter stroom geleidt dan een oplossing van een zwak zuur met gelijke molariteit.

B 10

Geef de reactievergelijking met toestandsaanduiding die optreedt als de volgende zuren in water worden opgelost en geef de notatie van de oplossing van het zuur.

- a het sterke zuur waterstofjodide
- b het zwakke zuur fosforzuur

B 11

Het sterke zuur waterstofbromide (HBr) is gasvormig bij kamertemperatuur.

- a Geef de reactievergelijking met toestandsaanduiding van de reactie die optreedt als waterstofbromide in water wordt opgelost.

Het zwakke zuur waterstoffluoride (HF) is een gas bij kamertemperatuur.

- b Geef de reactievergelijking met toestandsaanduiding van de reactie die optreedt als waterstoffluoride in water wordt opgelost.

B 12

Sorbinezuur is een zuur dat aan veel voedingsmiddelen wordt toegevoegd om de groei van bacteriën en schimmels te vertragen. De houdbaarheid van voedingsmiddelen wordt daardoor vergroot.

De molecuulformule van sorbinezuur is $C_6H_8O_2$. Het is een zwak zuur dat één H^+ kan afgeven.

- a Geef de vergelijking van de reactie die verloopt als sorbinezuur wordt opgelost in water.

Als sorbinezuur wordt opgelost in water is slechts een klein deel geïoniseerd. De groeivertragende werking hangt af van de pH van het voedingsmiddel waaraan het sorbinezuur wordt toegevoegd. In voedingsmiddelen die een pH hoger dan 7 hebben, is het niet werkzaam. Het evenwicht van de reactie bij a verschuift dan helemaal naar rechts.

- b Leg uit of de groeivertragende werking moet worden toegeschreven aan sorbinezuurmoleculen of aan sorbaationen.

B 13

Aziijnzuur is een bekend zuur dat veel verschillende toepassingen heeft. Het heeft een heel herkenbare geur. Je noemt aziijnzuur in pure vorm, dus zonder water, wel ijsazijn. Het smeltpunt van zuiver aziijnzuur is $17^\circ C$.

Onder deze temperatuur vormt het heldere kleurloze kristallen.

Schoonmaakazijn is een oplossing van aziijnzuur. Vaak wordt dit gebruikt om te ontkalken. Meestal ligt het massapercentage aziijnzuur in de oplossing rond de 10%. Tafelazijn wordt veel gebruikt als onderdeel van een dressing in salades. Meestal ligt het massapercentage aziijnzuur in deze oplossing rond de 5,0%

- a Bereken hoeveel gram aziijnzuur er in schoonmaakazijn en in tafelazijn aanwezig is. Ga ervan uit dat de dichtheid van beide oplossingen $1,0 \text{ kg L}^{-1}$ is en gebruik de hierboven genoemde percentages.
- b Bereken de molariteit van de aziijnzuur in beide oplossingen.

Zowel schoonmaakazijn als tafelazijn kan elektrische stroom geleiden.

- c Leg uit welke oplossing de stroom het beste geleidt.
- d In welke oplossing is de $[H_3O^+]$ het hoogst?

B 14

Lees de tekst in het kader 'Zuur aardgas' en beantwoord de volgende vragen.

Sommige aardgasvelden leveren 'zuur' aardgas. Dit gas bevat het zwakke zuur diwaterstofsulfide.

- a Geef de vergelijking van de reactie die verloopt als diwaterstofsulfide in water oplost.

Het zure aardgas wordt door een kilometers lange pijpleiding naar de gaszuiveringsinstallatie (GZI) geleid. Het materiaal van de pijpleidingen moet aan zeer strenge normen voldoen.

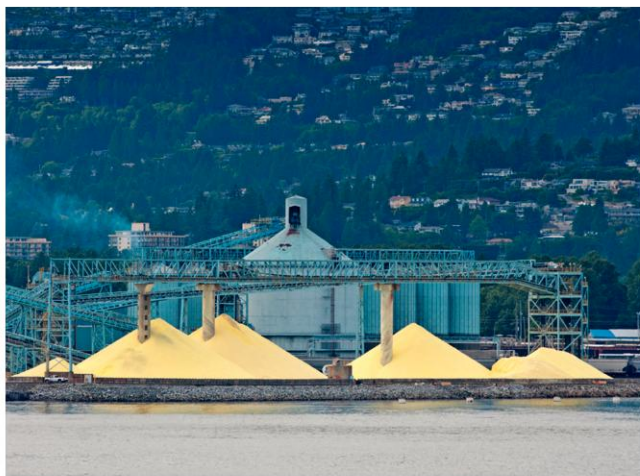
- b** Bedenk een reden waarom het materiaal voor het transport van dit gas aan zulke strenge normen moet voldoen.

‘Zuur’ aardgas bevat 0,50% H_2S per m^3 . Een klein gasveld levert 1,2 miljoen m^3 per dag van dit gas aan de GZI.

- c** Bereken hoeveel m^3 H_2S aanwezig is in 1,2 miljoen m^3 aardgas.
- d** Bereken hoeveel mol H_2S dit is. Gebruik bij je berekening $V_{\text{mol}} = 24,0 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$.

Met een sulfinoloplossing is het H_2S uit de gasstroom verwijderd en het H_2S wordt in het clausproces in twee stappen omgezet in zwavel. In de eerste stap reageert een deel van de H_2S met zuurstof tot zwaveldioxide en water. In de tweede stap wordt de rest van H_2S met zwaveldioxide omgezet in water en zwavel.

- e** Geef de reactievergelijkingen van dit proces. Noteer je antwoord als:
stap 1: ...
stap 2: ...
- f** Bereken met je antwoord bij d hoeveel ton zwavel je per dag kunt produceren (figuur 8.15).



8.15 Bergen gele zwavel gewonnen via het clausproces

Het zwavel wordt geleverd aan een zwavelzuurfabriek. Daar wordt het zwavel met zuurstof en water omgezet in het sterke zuur zwavelzuur.

- g** Geef de reactievergelijking van dit proces.

Bij het oplossen van zwavelzuur, een sterk zuur, in water ontstaan HSO_4^- -ionen die zelf een zwak zuur zijn.

- h** Geef de reactievergelijking van de reactie van dit zwakke zuur met water.

C 15

Citroenzuur is een driewaardig zuur met molecuulformule $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$.

- a** Wat denk je dat wordt bedoeld met de term ‘driewaardig’?

Je wilt bepalen hoe groot het massapercentage citroenzuur in een bepaald snoepje is. Om dat te bepalen kun je de H^+ -ionen in de oplossing laten reageren met OH^- -ionen, waarbij je nauwkeurig bepaalt hoeveel mol OH^- -ionen daarvoor nodig is.

Hiertoe weeg je het snoepje, verpoedert het en lost het op in water. Vervolgens bepaal je hoeveel mol OH^- -ionen nodig is om te reageren met alle H^+ -ionen die uit de citroenzuurmoleculen kunnen afsplitsen. Met behulp van dit gegeven kun je dan het massapercentage citroenzuur uitrekenen. Je had $6,64 \cdot 10^{-4}$ mol OH^- -ionen nodig voor de reactie met citroenzuur.

- b** Geef de vergelijking van de reactie tussen de H^+ - en de OH^- -ionen
- c** Bereken het aantal mol citroenzuur in het onderzochte snoepje.

Het onderzochte snoepje woog 2,007 g.

- d** Bereken het massapercentage citroenzuur in het onderzochte snoepje.

C 16

In supermarkten heb je een ruime keuze aan wc-reinigers. Je kiest twee wc-reinigers waar geen bleekmiddel in zit. Reiniger A bevat volgens het etiket zoutzuur (een HCl -oplossing) en reiniger B azijnzuur. Beide reinigers zijn bedoeld om kalkaanslag te verwijderen zodat zich daar geen bacteriën in kunnen nestelen.

Je onderzoekt het kalk verwijderend vermogen van de reinigers. Je doet van beide reinigers evenveel in een erlenmeyer en voegt aan beide evenveel kalkpoeder toe. Je ziet in de erlenmeyer met reiniger A een snellere gasontwikkeling dan in de erlenmeyer met reiniger B. Als verklaring denk je dat de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ in erlenmeyer A groter is dan in erlenmeyer B.

- a** Bedenk een proef waarmee je kunt bewijzen of je verklaring juist is. Noem het materiaal dat je voor je bewijs gebruikt. Geef een voorbeeld van resultaten waaruit blijkt dat je verklaring juist is.

Uit de proef blijkt dat de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ in A inderdaad groter was dan in B. Na verloop van tijd zijn de reacties in de beide erlenmeyers beëindigd. In A is nog kalk over, maar in de erlenmeyer B (azijnzuur) heeft tot je verbazing alle kalk gereageerd. Als verklaring hiervoor bedenk je dat de niet-geïoniseerde azijnzuurmoleculen in reiniger B ook hebben gereageerd.



8.16 In het Guggenheim-museum staat een massief gouden toiletpot van de kunstenaar Maurizio Cattelan. Bezoekers staan in de rij om dit toilet te gebruiken. Ook dit toilet moet gereinigd worden, maar is gewone wc-reiniger daarvoor geschikt of niet?

- b** Bedenk een proef waarmee je kunt bewijzen of niet-geïoniseerde azijnzuurmoleculen met kalk kunnen reageren.

Uit deze proef volgt dat de niet-geïoniseerde azijnzuurmoleculen niet met kalk reageren. Toch moeten ook de niet-geïoniseerde azijnzuurmoleculen in erlenmeyer B op de een of andere manier mee reageren, anders zou er in erlenmeyer B kalk over moeten zijn.

- c** Leg uit op welke manier de azijnzuurmoleculen toch hebben meegewerkt aan het reageren van de kalk.

Waterstofchloride (HCl) en azijnzuur zijn allebei zuren, die één H^+ kunnen afstaan. Als je van allebei de reinigers evenveel neemt, zou je verwachten dat in beide erlenmeyers de kalk verdwenen was.

- d** Bedenk een reden waarom in erlenmeyer A nog kalk over is.
- e** Leg uit of allebei de wc-reinigers geschikt zijn voor het gouden toilet, of slechts een van de twee.

Experimenten

8.3 Geleidingsvermogen van zure oplossingen

Je onderzoekt of een oplossing van waterstofchloride en een oplossing van azijnzuur stroom geleiden.

8.4 Elektrolyse van zure oplossingen

Je onderzoekt van een oplossing van waterstofchloride welke stoffen ontstaan als je de oplossing elektrolyseert.

8.5 Geleidingsvermogen van verdunde oplossingen

In dit experiment onderzoek je het geleidingsvermogen van zure oplossingen van verschillende molariteit.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat het verschil is tussen een sterk en een zwak zuur;
- de reactie van een sterk zuur met water weergeven in een reactievergelijking;
- de reactie van een zwak zuur met water weergeven in een reactievergelijking;
- de notaties geven voor oplossingen van sterke en zwakke zuren.

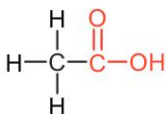
Looizuur

In Fez in Marokko worden huiden geloid en geveerd. Vroeger werd voor het looien looizuur gebruikt, dat gewonnen werd uit de bast van eikenbomen. Looizuur is een mengsel van op elkaar lijkende stoffen die bestaan uit een glucosemolecuul waaraan een aantal moleculen galluszuur is gebonden. Looizuren zijn organische zuren.

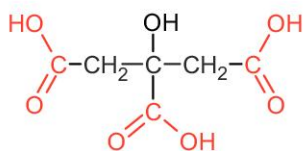
**Je leert**

- welke groepen van zuren er zijn;
- de namen en formules van een aantal zuren.

8.3 Formules van zuren



8.17 Azijnzuur of ethaanzuur

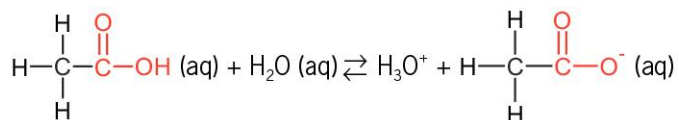


8.18 Citroenzuur

Organische zuren

De looizuren die bij het looien van huiden werden gebruikt behoren tot de organische zuren. **Organische zuren** zijn stoffen waarvan de moleculen een koolstofskelet hebben. In hoofdstuk 6 heb je de karakteristieke groep van een organisch zuur leren kennen. Deze groep staat in figuur 8.17 in het rood afgebeeld.

Als deze groep in een molecuul aanwezig is, dan is de stof een zuur en kan het dus een H^+ -ion afstaan. Nu heeft azijnzuur vier waterstofatomen, maar alleen het waterstofatoom dat in de zuurgroep zit kan worden afgestaan als H^+ -ion. De waterstofatomen die direct aan een koolstofatoom gebonden zitten kunnen dus niet worden afgestaan. Azijnzuur is daarom een **eenwaardig zuur**, het kan één H^+ -ion afstaan:



Naast het H_3O^+ -ion ontstaat er ook een negatief geladen ion. Dit ion is het **zuurrestion**. De zuurrestionen van alkaanzuren heten alkanoaten. Zo is ethanoaat de naam van het zuurrestion van ethaanzuur. Het zuurrestion van propaanzuur heet propanoaat.

Citroenzuur heeft drie van deze zuurgroepen in één molecuul. Citroenzuur is dus in staat om drie H^+ -ionen af te staan. Je noemt citroenzuur daarom een **driewaardig zuur**. Zuren die in staat zijn om meer dan één H^+ -ion af te staan zijn **meerwaardige zuren**, zie figuur 8.18.

Anorganische zuren

Zuren zonder koolstofskelet noem je **anorganische zuren**. Je hebt in de vorige paragraaf HCl leren kennen. Een overzicht van een aantal belangrijke anorganische zuren staat in tabel 8.19.

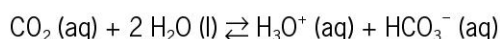


8.20 Het instabiele 'koolzuur' zit in cola. Mentos in cola zorgt ervoor dat alle CO_2 in één keer ontsnapt, met enorme colafontainen als gevolg.

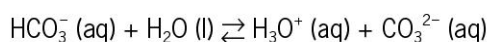
naam	formule	naam	formule
waterstofchloride	HCl	diwaterstofsulfide	H_2S
salpeterzuur	HNO_3	koolzuur	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} (\text{H}_2\text{CO}_3)$
fosforzuur	H_3PO_4	zwaveligzuur	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} (\text{H}_2\text{SO}_3)$
waterstofbromide	HBr	waterstofcyanide	HCN
zwavelzuur	H_2SO_4	waterstofjodide	HI

8.19

'Koolzuur' en 'zwaveligzuur' bestaan in feite alleen als oplossing van CO_2 of SO_2 in water. H_2CO_3 en H_2SO_3 zijn **instabiele zuren** (figuur 8.20). Het zijn beide tweewaardige zuren. Als je CO_2 in water oplost, dan krijg je de volgende reactie:



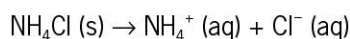
Er zou nog een tweede reactie kunnen verlopen:



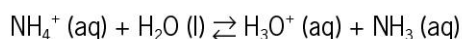
Het zuur is dus in staat om twee H_3O^+ -ionen te laten ontstaan. Omdat het eerste evenwicht naar links ligt, zal de tweede reactie vrijwel niet optreden. Daarom verliest een meerwaardig zwak zuur maar één H^+ -ion in water. De tweede reactie schrijf je dus niet op.

Ionen als zuur

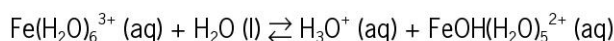
Sommige positieve of negatieve ionen kunnen ook als zuur reageren. Bij het oplossen van een zout in water kunnen vrije ionen ontstaan die zich als een zuur gedragen. Als je bijvoorbeeld het zout ammoniumchloride (figuur 8.21) oplost in water:



dan zullen de ammoniumionen vervolgens met het water reageren:



Een ammoniumion kan één H^+ afstaan en is een zwak zuur, er treedt dus een evenwichtsreactie op. Ook zijn bepaalde gehydrateerde metaalionen zwakke zuren. Als voorbeeld nemen we het ijzer(III)ion. Als dit ion in water wordt gehydrateerd kan het een H^+ -ion uit de watermantel afgeven:



Het hydraterende watermolecuul dat een H^+ -ion weggeeft, wordt een OH^- -ion.

Als je wilt weten of een zuur, een sterk zuur of een zwak zuur is, kun je Binas tabel 49 gebruiken. De bovenste zeven zuren in de tabel zijn sterk en reageren dus aflopend met water. Alle zuren onder H_3O^+ zijn zwak en geven een evenwichtsreactie met water. Hierbij geldt dat hoe lager een zuur staat, hoe zwakker het is. Alle zuren onder H_2O geven geen reactie met water.



8.21 Ammoniumchloride ofwel salmiak is een onderdeel van drop.

Azijnzuur in de keuken

Het meest bekende zuur in het huishouden is het organische zuur azijnzuur. Je kwam het in de opgaven al tegen als schoonmaakmiddel, maar ook bij voedselbereiding is het een veelgebruikt zuur. Neem bijvoorbeeld augurken, die zijn niet zuur van zichzelf. Augurken zijn een klein soort komkommer, vrijwel zonder smaak. Om zure augurken te krijgen moeten de augurken eerst 24 uur in het zout om er een hoeveelheid vocht aan te onttrekken. Na afspoelen doe je ze met kruiden in een pot en vult de pot met een oplossing van azijnzuur. Na twee maanden heb je je zure augurken (figuur 8.22).

Een speciale azijn is de balsamicoazijn die wordt gemaakt van de trebbianodruiven die groeien in Modena in Noord-Italië.



8.22 In dit bedrijf worden augurken ingemaakt. Deze grotere exemplaren leveren de bekende zure bommen.

Bij de bereiding van aceto balsamico wordt het sap van versgeperste rijpe druiven enkele uren ingekookt, tot ongeveer 50% van de oorspronkelijke hoeveelheid. Daarbij worden de suikers omgezet in alcohol en de alcohol wordt omgezet in azijnzuur.

De aceto balsamico blijft gedurende het rijpingsproces niet in één en hetzelfde vat. Er is meestal een reeks van vijf of zes vaatjes van aflopende grootte, gemaakt van verschillende soorten hout. Het kleinste vaatje bevat de oudste en meest geconcentreerde (en dus duurste) balsamico. De aceto balsamico tradizionale is minimaal twaalf jaar oud, maar kan ook veel ouder zijn. Van honderd liter in het begin van het proces blijft er maar een paar liter aceto over.



8.23 Vaten van verschillende afmetingen waarin de beroemde balsamicoazijn wordt gemaakt

● Opdracht B23

Samenvatting

- Een organisch zuur is een stof met een koolstofskelet en een -COOH -groep. Het H-atoom in deze zuurgroep kan worden afgestaan als H^+ -ion.
- Een anorganisch zuur is een stof zonder een koolstofskelet.
- Koolzuur en zwaveligzuur zijn instabiele zuren.
- Een meerwaardig sterk zuur kan meerdere H^+ -ionen afgestaan. Een meerwaardig zwak zuur verliest in water maar één H^+ -ion.
- Sommige ionen kunnen als zuur reageren.
- In Binas tabel 49 staat een groot aantal sterke en zwakke zuren.

Opdrachten

A 17

- a** Zoek in Binas tabel 49 op of de volgende zuren sterk of zwak zijn.
- 1 waterstofjodide
 - 2 fosforzuur
 - 3 zwavelzuur
 - 4 het ammoniumion
- b** Geef bij elk van deze zuren aan of het een één-, twee-, of driewaardig zuur is.

B 18

- a** Geef steeds de reactievergelijking die optreedt als de zuren uit opdracht A17 in water worden opgelost. Geef ook de toestandsaanduiding. Gebruik indien nodig de kook- en smeltpunten in Binas tabel 42.
- b** Geef de notatie van de zure oplossingen die ontstaan als de zuren in water worden opgelost.

B 19

Zoek op internet of in Binas tabel 82B het E-nummer van citroenzuur op en zoek minstens twaalf producten waarin citroenzuur aanwezig is.

B 20

Methaanzuur is een organisch zuur.

- a** Geef de reactievergelijking in molecuulformules van de reactie die verloopt bij het oplossen van methaanzuur in water.
- b** Geef deze reactievergelijking ook in structuurformules.

B 21

De stof zwaveldioxide ontstaat bij het verbranden van zwavelhoudende brandstoffen. Ook komt het vrij bij vulkanen, wat je daar ook kunt ruiken. Het gas werkt irriterend op de longen. Als zwaveldioxide in water oplost, ontstaat er een oplossing van zwaveligzuur, een zwak zuur. Geef de reactievergelijking van de reactie die optreedt als zwaveldioxide in water oplost.

B 22

In cola zit het driewaardig zuur fosforzuur.

- a** Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als fosforzuur in water oplost.

Het zout natriumdiwaterstoffosfaat is goed oplosbaar in water.

- b** Geef het oplossen van dit zout in een vergelijking weer.

Het diwaterstoffosfaation is een zuur en reageert met water.

- c** Geef de vergelijking van de reactie die optreedt.

Ook het zout natriummonowaterstoffosfaat is goed oplosbaar in water.

- d** Geef het oplossen van dit zout in een reactievergelijking weer. Geef vervolgens de vergelijking van de reactie die optreedt als het monowaterstoffosfaation als zuur reageert met water.
- e** Vergelijk de zuursterktes van de drie zuren (fosforzuur, het diwaterstoffosfaation en het monowaterstoffosfaat-ion) en leg uit welk zuur de meeste oxoniumionen vormt en welk zuur het minst.

B 23

Lees de tekst in het kader 'Aziijnzuur in de keuken' en beantwoord de volgende vragen.

Voordat aan de augurken een oplossing van azijn wordt toegevoegd worden ze eerst 24 uur in zout gelegd. Zout is een hygroscopische stof en trekt vocht uit de augurken.

- a** Bedenk een reden waarom je eerst vocht onttrekt aan de augurken.

Tijdens het bereidingsproces van balsamicoazijn wordt de eerst gevormde alcohol omgezet in azijnzuur. Als je alcohol open laat staan aan de lucht verloopt dit proces met de zuurstof uit de lucht. Uit ethanol en zuurstof ontstaan azijnzuur en nog een ander product.

- b** Geef de reactievergelijking van deze omzetting.

Voor de rijping van de aceto balsamico worden vaten gebruikt van verschillende houtsoorten.

- c** Bedenk een reden waarom er verschillende houtsoorten worden gebruikt.

De inkoop prijs van een druppel aceto balsamico tradizionale is 8 eurocent. Het volume van een druppel is 0,050 mL.

- d** Bereken de prijs van een flesje aceto balsamico tradizionale met een inhoud van 500 mL.

Azijnzuur behoort tot de zwakke zuren en bij de reactie met water heeft dus maar een klein deel van de azijnzuurmoleculen een H^+ -ion afgestaan. Een oplossing van azijnzuur bevat per liter $1,82 \cdot 10^{-3}$ mol H^+ -ionen. Slechts $9,1 \cdot 10^{-2}\%$ van het azijnzuur is geïoniseerd.

e Bereken de molariteit van deze oplossing.

C 24

Je lost 1,0 mol van de volgende zuren op in 1,0 L water. Je krijgt zo vier oplossingen van:

- 1 waterstoffluoride
- 2 zwavelzuur
- 3 salpeterzuur
- 4 waterstofhypojodiet (HIO)

Iedere oplossing heeft een andere $[\text{H}_3\text{O}^+]$.

- a** Zet de vier oplossingen met behulp van Binas tabel 49 in volgorde van toenemende $[\text{H}_3\text{O}^+]$. Licht de volgorde toe.
- b** Leg uit waarom je niet altijd kunt zeggen dat een zwavelzuuroplossing een hogere $[\text{H}_3\text{O}^+]$ heeft dan een salpeterzuuroplossing.

C 25

De kleuren van hortensia's zijn over het algemeen rood, roze en wit. De kleur van de bloemen hangt af van de bodem: de meeste roze soorten kunnen onder invloed van een aantal factoren verkleuren.

In zure aluminium houdende grond zullen de bloemen van de hortensia blauw kleuren. De pH van de grond moet hiervoor lager zijn dan 5,1. In zure grond kan de hortensia wel aluminium opnemen, in basische grond lukt dat niet.

- a** Geef de formules van twee deeltjes die, naast water, in elk geval moeten voorkomen in (zure) aluminium houdende grond.

Je kunt eventueel aluminiumionen toevoegen aan de grond. Er is bijvoorbeeld speciale hortensiamest voor blauwe hortensia's in de handel.

Dit is een meststof met aluminiumsulfaat of met aluin. De formule van aluin is $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

- b** Geef de vergelijking voor het oplossen van aluin in water.
- c** Bereken het massapercentage aluminium in aluin. Geef je antwoord in vier significante cijfers.

Aluminiumionen zorgen door een reactie met water voor het zuur worden van de grond.

- d** Geef de reactievergelijking van aluminiumionen met water waaruit blijkt dat de grond zuur wordt.

Bron: CE havo 2009-II

C 26 ★

Als je in Binas tabel 49 kijkt, dan zie je dat van de halogeenzuren (HI , HBr , HCl en HF) alleen HF een zwak zuur is.

De sterkte van deze zuren is afhankelijk van twee dingen:

- de sterkte van de binding in het molecuul;
- de polariteit van het molecuul.

Algemeen geldt: als een molecuul meer polair is, dan is het een sterker zuur.

- a** Bepaal het verschil in elektronegativiteit voor de vier halogeenzuren en laat zien dat de regel voor deze zuren niet op lijkt te gaan.

In tabel 8.24 staat de sterkte van de binding van alle vier de halogeenzuren gegeven.

stof	bindingssterkte (kJ mol^{-1})
H-F	563
H-Cl	432
H-Br	366
H-I	299

8.24

- b** Leg uit waarom HF toch een zwak zuur is, ondanks de grote polariteit van het molecuul.

Je kunt nu

- onderscheid maken tussen organische en anorganische zuren;
- uitleggen wat een instabiel zuur is;
- uitleggen hoe ionen als zuur kunnen reageren;
- aan de hand van Binas tabel 49 bepalen of een zuur sterk of zwak is.

Citrusfruit

Bij het Fête du Citron in de Franse stad Menton worden fraaie kunstwerken van citrusfruit gemaakt. Hoewel sinaasappels en vooral citroenen best zuur kunnen smaken, zit er in citrusfruit toch alleen een zwak zuur. In citrusfruit wordt de zure smaak veroorzaakt door citroenzuur.



Je leert

- de pH te berekenen van een oplossing van een sterk zuur in water;
- de pH te berekenen van een oplossing van een zwak zuur in water.

8.4 pH-berekeningen

De pH

Citrusvruchten bevatten het zwakke zuur citroenzuur, maar er zijn meer planten die een zwak zuur bevatten. In rabarber zit bijvoorbeeld oxaalzuur. Als planten groeien is de zuurgraad van de grond ook belangrijk. Planten halen voedingsstoffen uit de bodem en deze stoffen moeten worden aangevuld. Boeren doen dit door de grond te bemesten met kunstmest. Omdat de vruchtbaarheid van de bodem ook afhangt van de pH, bevat de mest vaak kalk om de pH te regelen.

Door gebruik te maken van satellietssystemen voor navigatie en bodemanalyse (figuur 8.25) worden tegenwoordig de positie en de hoeveelheid benodigde stof nauwkeurig bepaald. Je kunt zo per vierkante meter bepalen wat de grond nodig heeft.



8.25 Het is door het gebruik van gps en sensoren mogelijk om bemesting van het land volledig geautomatiseerd te variëren en te doseren.

Bij bodemanalyse, maar ook bij andere toepassingen waar je met zuren te maken hebt is het van belang om de pH zo nauwkeurig mogelijk te weten. Je kunt de pH van een oplossing niet alleen meten, maar ook berekenen. De zuurgraad van een oplossing is afhankelijk van de hoeveelheid H_3O^+ -ionen in de oplossing. Om de pH uit te rekenen kun je de volgende formule gebruiken:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

Doordat je de negatieve logaritme van de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ neemt, geldt: hoe hoger de concentratie, hoe lager de pH. Je schrijft achter de getalwaarde van de pH geen eenheid. Je kunt vanuit de pH ook de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ uitrekenen. Hiervoor gebruik je de formule:

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$$



8.26 Dit 24 karaat goud is een edel metaal en lost niet op onder normale omstandigheden, alleen in koningswater lost het op.

Rekenvoorbeeld 1

- a** De $[\text{H}_3\text{O}^+]$ in een oplossing is $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$. Bereken de pH.
b Een oplossing heeft een pH van 3,20. Bereken de $[\text{H}_3\text{O}^+]$.

Uitwerkingen:

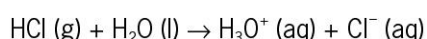
- a** $\text{pH} = -\log 2,4 \cdot 10^{-2} = 1,619788 = 1,62$
b $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3,20} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$

De pH staat in drie **significante cijfers**, terwijl de concentraties maar twee significante cijfers hebben. Voor pH-berekeningen geldt dat het aantal significante cijfers in de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ gelijk moet zijn aan het aantal decimalen in de pH.

De pH van een oplossing van een sterk zuur

Om de pH te berekenen moet je eerst de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ uitrekenen.

Waterstofchloride is een sterk zuur, in water treedt de volgende aflopende reactie op:

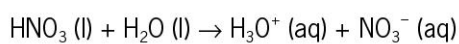


Het aantal mol H_3O^+ -ionen dat ontstaat, is dus gelijk aan het aantal mol HCl dat je oplost. De pH van een sterk zuur kun je rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing.

Rekenvoorbeeld 2

Je hebt een $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ M}$ salpeterzuuroplossing. Bereken de pH.

Salpeterzuur is een sterk zuur (figuur 8.27), zodat:



De $[\text{H}_3\text{O}^+]$ is gelijk aan de molariteit van de salpeterzuuroplossing, dus $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$.
 De pH is dan: $\text{pH} = -\log 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,92$

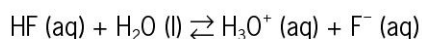
Het antwoord moet in twee decimalen, omdat de concentratie in twee significante cijfers is gegeven.



8.27 In de maatkolven zit koningswater. Koningswater is een 1 : 3 mengsel van geconcentreerd salpeterzuur en 37% zoutzuur.

De pH van een oplossing van een zwak zuur

Een zwak zuur is niet volledig gesplitst in ionen, dus je kunt nu de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ niet rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing. We nemen als voorbeeld het zwakke zuur waterstoffluoride. In water treedt het volgende evenwicht op:



Omdat er een evenwicht is, kun je de evenwichtsvoorwaarde opstellen:

$$K = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{F}^-]}{[\text{HF}][\text{H}_2\text{O}]}$$

Er is bij oplossingen altijd een grote hoeveelheid water aanwezig. Bij 293 K is de $[H_2O]$ gelijk aan $55,4 \text{ mol L}^{-1}$.

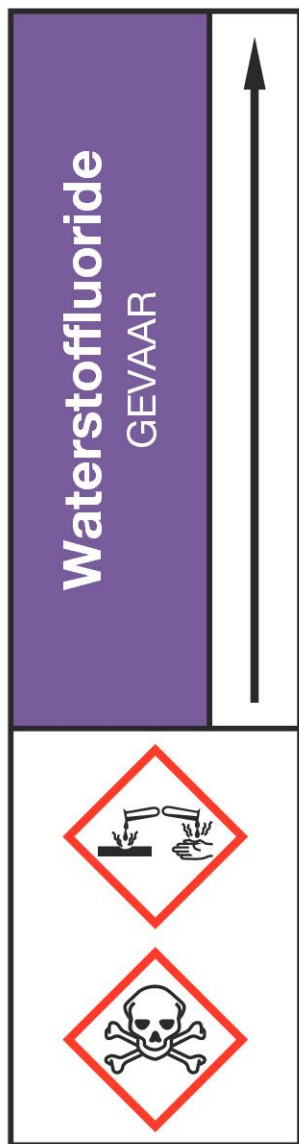
Deze waarde is veel groter dan de concentraties van de opgeloste stoffen. Je mag de $[H_2O]$ dan ook constant noemen. Omdat $[H_2O]$ constant is, geldt:

$$K[H_2O] = K_z = \frac{[H_3O^+][F^-]}{[HF]}$$

K_z noem je de **zuurconstante**. Als je de K_z en de molariteit van de oplossing weet, kun je de $[H_3O^+]$ uitrekenen. Net als bij de evenwichtsconstante is de zuurconstante alleen afhankelijk van de temperatuur.

Van een aantal zuren is de zuurconstante te vinden in Binas tabel 49. In die tabel neemt de K_z steeds verder af naarmate je lager in de tabel komt. Hoe lager de waarde van K_z , hoe zwakker het zuur.

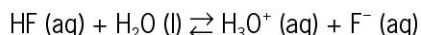
Om de pH te berekenen van een zwak zuur kun je een overzichtstabel maken zoals je in hoofdstuk 7 hebt geleerd. In de tabel staat het aantal mol van elk van de deelnemende stoffen bij het begin van het proces (t_0), hoeveel mol er wordt omgezet en hoeveel er na instelling van het evenwicht (t_{ev}) is. Dat zie je in rekenvoorbeeld 3.



8.28 Waterstoffluoride is een zeer corrosief zuur, waar je voorzichtig mee moet omgaan. Het wordt meestal opgelost in water getransporteerd. Op de leidingen worden leidingmerkers aangebracht zoals hierboven.

Rekenvoorbeeld 3

Een oplossing van HF (figuur 8.28) heeft de molariteit 2,5 M. Bereken de pH.



De $[H_3O^+]$ is niet gelijk aan de molariteit van de oplossing. Omdat je niet weet hoeveel mol HF er reageert, stel je deze hoeveelheid gelijk aan x . Er blijft dan $2,5 - x$ mol HF per liter over bij evenwicht. Er ontstaat x mol H_3O^+ en x mol F^- per liter.

	[HF]	[H ₃ O ⁺]	[F ⁻]
t_0	2,5	0	0
omgezet	-x	+x	+x
t_{ev}	2,5 - x	x	x

Je kunt deze gegevens invullen in de evenwichtsvoorwaarde, de K_z zoek je op in Binas tabel 49.

$$K_z = \frac{[H_3O^+][F^-]}{[HF]}$$

$$6,3 \cdot 10^{-4} = \frac{(x) \times (x)}{2,5 - x} = \frac{x^2}{2,5 - x}$$

Als je deze tweedegraadsvergelijking uitwerkt, kun je met de abc-formule x berekenen. Soms kun je gebruikmaken van een vereenvoudigde berekening. Een uitgewerkt voorbeeld hiervan vind je in het uitwerkingenboek bij opgave B31.

$x = [H_3O^+] = 0,039 \text{ mol L}^{-1}$. De pH is dan $-\log 0,039 = 1,41$.

● Experiment 8.6

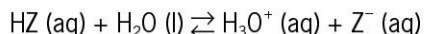
Rekenen aan zwakke zuren

Bij het berekenen van de pH van een zwak zuur moeten de K_z en de molariteit van de oplossing bekend zijn. In rekenvoorbeeld 4 zie je hoe je de K_z van een onbekend zuur kunt berekenen als de pH en de molariteit bekend zijn. In rekenvoorbeeld 5 zie je hoe je de molariteit van een oplossing van een zuur kunt berekenen als de pH en de K_z bekend zijn.

Rekenvoorbeeld 4

Een oplossing van een onbekend eenwaardig zwak zuur heeft de molariteit 2,1 M. De pH is gelijk aan 2,22. Bereken de K_z van dit onbekende zuur en bepaal met behulp van Binas tabel 49 welk zuur dit kan zijn.

De pH = 2,22, dan is $[H_3O^+] = 10^{-2,22} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$. Schrijf voor het onbekende zuur: HZ. De evenwichtsreactie is dan:



Omdat er $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol H}_3\text{O}^+$ ontstaat, is er ook $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol Z}^-$ aanwezig.

Er heeft dan $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol HZ}$ gereageerd.

	$[H_3O^+]$	$[Z^-]$	$[HZ]$
t_0	0	0	2,1
omgezet	$+6,0 \cdot 10^{-3}$	$+6,0 \cdot 10^{-3}$	$-6,0 \cdot 10^{-3}$
t_{ev}	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,1 - 6,0 \cdot 10^{-3}$

Zet deze gegevens weer in de evenwichtsvoorwaarde:

$$K_z = \frac{[H_3O^+][Z^-]}{[HZ]}$$

$$K_z = \frac{(6,0 \cdot 10^{-3})^2}{2,1}$$

Je vult voor $[HZ]$ de waarde 2,1 in omdat na aftrekken dit het antwoord in significante cijfers is.

$K_z = 1,7 \cdot 10^{-5}$. In Binas zie je dat het onbekende zuur ethaanzuur kan zijn.

8.29 Soms worden een sterk zuur en een zwak zuur gecombineerd gebruikt, zoals bij het beitsen van roestvrij staal met een mengsel van salpeterzuur en waterstoffluoride.

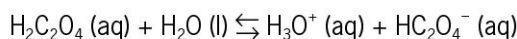




8.30 In rabarber zit oxaalzuur, daardoor is rabarber een erg zure groente die met suiker gezoet moet worden. Je kunt ook wat kalk toevoegen om het oxaalzuur te neutraliseren.

Rekenvoorbeeld 5

Je hebt een onbekende hoeveelheid van het zwakke zuur oxaalzuur in 1,0 L water (figuur 8.30). De pH is gelijk aan 2,30. Bereken de molariteit van de oxaalzuuroplossing.



De $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-2,30} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$. De $[\text{H}_3\text{O}^+]$ is gelijk aan de $[\text{HC}_2\text{O}_4^-]$.

	$[\text{H}_3\text{O}^+]$	$[\text{HC}_2\text{O}_4^-]$	$[\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4]$
t_0	0	0	x
omgezet	$+5,0 \cdot 10^{-3}$	$+5,0 \cdot 10^{-3}$	$-5,0 \cdot 10^{-3}$
t_{eq}	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$x - 5,0 \cdot 10^{-3}$

$$K_z = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{HC}_2\text{O}_4^-]}{[\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4]}$$

$$5,6 \cdot 10^{-2} = \frac{(5,0 \cdot 10^{-3})^2}{x - 5,0 \cdot 10^{-3}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{x - 5,0 \cdot 10^{-3}}$$

$$5,6 \cdot 10^{-2} (x - 5,0 \cdot 10^{-3}) = 2,5 \cdot 10^{-5}$$

$$x = 5,4 \cdot 10^{-3}$$

De molariteit van de oxaalzuuroplossing is $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ M}$.

Rekenvoorbeeld 6

$$\frac{1,98 + 0,6}{1,338} = \frac{2,58}{1,338}$$

$$= 1,943 \, 198 \, 804$$

$$= 1,9$$

Bij optellen van 1,98 + 0,6 wijzigt de significantie. In de uitkomst 2,58 zijn alleen de 2 en de 5 significant. Het eindantwoord moet in het juiste aantal significante cijfers, in dit geval 2.

Samenvatting significante cijfers

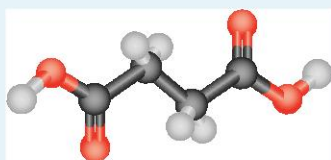
Regels voor significante cijfers:

- 1 Telwaarden hebben geen invloed op de nauwkeurigheid van het antwoord.
- 2 Bij optellen en aftrekken is het aantal cijfers achter de komma van een uitkomst gelijk aan het kleinste aantal cijfers achter de komma waarmee je de berekening uitvoert.
- 3 Bij vermenigvuldigen en delen heeft de uitkomst van de berekening evenveel significante cijfers als de gemeten waarde met het kleinste aantal significante cijfers.
- 4 Nullen waarmee een getal begint zijn nooit significant.
- 5 Voor pH-berekeningen geldt dat het aantal significante cijfers in de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ gelijk moet zijn aan het aantal decimalen in de pH.

Een berekening bestaat vaak uit twee of meer stappen. Na elke stap krijg je een tussenantwoord. De tussenantwoorden rond je meestal niet af. Alleen het *eindantwoord* rond je af op het juiste aantal significante cijfers. Komen in een berekening stappen voor waarvoor *verschillende* regels gelden, bijvoorbeeld optellen en delen, dan kan het aantal significante cijfers wijzigen. Dat geldt voor die tussenstappen waarin je meetwaarden optelt of aftrekt, zie rekenvoorbeeld 6. In je eindantwoord moet je daar rekening mee houden.

Barnsteen en biobarnsteenzuur

Barnsteen is een harssoort die lang geleden uit naaldbomen is gedropen en toen is versteend. Het is een gele stof waarin je soms insecten ziet zitten die miljoenen jaren geleden zijn ingesloten (figuur 8.32). In de vijftiende eeuw maakte de Duitse geleerde Agricola uit barnsteen door verhitting de stof barnsteenzuur. De systematische naam van barnsteenzuur is butaandizuur, waarvan een molecuulmodel hieronder staat.



8.31

Barnsteenzuur is een belangrijke stof in de chemische industrie. Het wordt toegepast in voedingsmiddelen, geneesmiddelen en als grondstof voor de productie van polymeren. Barnsteenzuur wordt gemaakt uit aardolie, maar met het opraken van de olievoorraden is er grote belangstelling voor de productie van biobarnsteenzuur. Biobarnsteenzuur wordt door de genetisch gemodificeerde *Escherichia coli*-bacterie uit glucose gemaakt. Als bron van glucose wordt nog mais gebruikt, maar er lopen onderzoeken om te kijken of cellulose als grondstof is te gebruiken. Met het gebruik van mais leg je beslag op voedselbronnen, dat is bij productie op grote schaal niet wenselijk. Cellulose daarentegen kan uit landbouwafval worden gehaald.

Een voorbeeld van een mogelijk toepassing van biobarnsteenzuur is in de verfindustrie. Bij de productie van verf zijn bindmiddelen nodig zoals alkydharsen. Alkydharsen bestaan voor ongeveer 50% uit vetzuren die al biologisch gewonnen worden. Als daar als vervanging van petrochemische grondstoffen nog biobarnsteenzuur bij komt, wordt dit product nog duurzamer. Je hebt dan alkydverven die voor 60% uit biogebaseerde grondstoffen bestaan.

Reverdia, het bedrijf van DSM en het Franse Roquette, produceert in Italië al meer dan 10 000 ton biobarnsteenzuur en is op zoek naar nieuwe locaties voor de uitbreiding van de productie.



8.32 Een ingesloten insect in barnsteen

● Opdracht B35

Samenvatting

- De pH van een oplossing bereken je met $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$.
- Bij gegeven pH bereken je de H_3O^+ -concentratie met: $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$
- Het aantal significante cijfers in de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ is gelijk aan het aantal decimalen in de pH.
- Bij een oplossing van een sterk zuur kun je de pH rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing.
- Voor een zwak zuur geldt: $\text{HZ}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Z}^-(\text{aq})$
De pH bereken je met de evenwichtsvoorwaarde: $K_z = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{Z}^-]}{[\text{HZ}]}$
- Hoe lager de waarde van K_z , hoe zwakker het zuur.
- Bij een zwak zuur kun je de molariteit van het zuur berekenen als de pH en K_z zijn gegeven.
- De K_z kun je berekenen als de pH en de molariteit zijn gegeven.

Opdrachten

A 27

De H_3O^+ -concentratie in drie oplossingen a, b en c bedraagt respectievelijk $1,0 \cdot 10^{-4}$, $5,0 \cdot 10^{-4}$ en $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$.

Bereken de pH voor elk van de drie oplossingen.

A 28

Bereken de H_3O^+ -concentratie in:

- a** maagsap met $\text{pH} = 1,4$
- b** regenwater met $\text{pH} = 4,42$
- c** geconcentreerd zoutzuur met $\text{pH} = -1,05$

B 29

Nico lost 89,6 g waterstofjodide op in 150 mL water.

Bereken de pH van de oplossing.

B 30

Stel steeds de evenwichtsvoorwaarde op voor oplossingen van de onderstaande zwakke zuren.

- a** waterstofcyanide (HCN)
- b** fosforzuur (H_3PO_4)
- c** het waterstofsulfaat (HSO_4^-)
- d** een gehydrateerd koperion ($\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$)

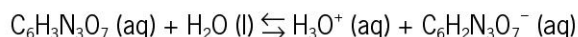
B 31

Bereken de pH van een 0,60 M oplossing van HNO_2 .

B 32

In mei 2009 kopte een krant: 'Explosieve stof bij school tot ontploffing gebracht'. De stof waar het hierbij om ging is picrinezuur, $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$.

Picrinezuur is een gele vaste stof. Oplossingen van deze stof werden vroeger op scholen bij het vak biologie gebruikt om preparaten van planten te kleuren. In droge toestand is picrinezuur explosief. Daarom wordt het geleverd in potten waarin vast picrinezuur onder water staat. In dit water is wat picrinezuur opgelost. Het opgeloste picrinezuur is gedeeltelijk geïoniseerd volgens:



In een pot picrinezuur heersen twee evenwichten:

- A** het evenwicht tussen vast picrinezuur en opgelost picrinezuur;
- B** het ionisatie-evenwicht van picrinezuur zoals hierboven is weergegeven.

- a** Leg voor beide evenwichten uit of het hierbij gaat om een homogeen of een heterogeen evenwicht.

Noteer je antwoord als volgt:

evenwicht A is een ... evenwicht, omdat ...

evenwicht B is een ... evenwicht, omdat ...

De oplosbaarheid van picrinezuur is niet hoog, namelijk 1,4 g per 100 mL. In een verzadigde oplossing van picrinezuur is 89% van het picrinezuur geïoniseerd. Hierdoor is een verzadigde oplossing van picrinezuur toch behoorlijk sterk zuur.

- b** Bereken de molariteit, in mol L^{-1} , van een verzadigde oplossing van picrinezuur.
- c** Bereken de pH van deze verzadigde oplossing.

Als het water uit een pot picrinezuur is verdampt, kan het picrinezuur sublimeren. Dit heeft tot gevolg dat zich kristallen picrinezuur tussen de pot en het deksel vormen. Dan kan het openen van de pot tot een explosie leiden door wrijving van het deksel langs de rand van de pot.

- d** Geef het sublimeren van picrinezuur in een vergelijking weer. Geef hierbij ook de toestandsaanduidingen.

Naar: CE havo 2011-II

B 33

Onder een sterk zuur wordt een zuur verstaan dat volledig ioniseert in water. Dit betekent niet dat bij gebruik van een ander oplosmiddel ook 100% ionisatie zal optreden. Zo blijkt zowel HClO_4 als HCl zich te gedragen als een zwak zuur in het geval azijnzuur (CH_3COOH) als oplosmiddel wordt gebruikt in plaats van water. Voor HClO_4 geldt dat in azijnzuur K_z gelijk is aan $1,3 \cdot 10^{-5}$. Voor HCl is de waarde van K_z in azijnzuur gelijk aan $2,8 \cdot 10^{-9}$.

Welke van de twee zuren is opgelost in azijnzuur het sterkst?

B 34

De pH van zuiver water is exact 7. Dit betekent dat er H_3O^+ -ionen in water aanwezig zijn. Gewoonlijk verwaarloos je deze hoeveelheid H_3O^+ -ionen als je de pH uitrekent. Alleen bij hele lage concentraties H_3O^+ gaat dat niet meer op.

- a** Bereken de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ in zuiver water.
- b** Bereken de pH van $1,0000 \cdot 10^{-3} \text{ M}$ zoutzuur eerst met en dan zonder het verwaarlozen van de hoeveelheid H_3O^+ in zuiver water.
- c** Leg uit waarom je niet kunt spreken van een zoutzuuroplossing.

B 35

Lees de tekst in het kader 'Barnsteen en biobarnsteen-zuur' en beantwoord de volgende vragen. Biobarnsteen-zuur is een duurzaam alternatief voor barnsteen-zuur dat wordt geproduceerd uit aardolie.

a Leg uit waarom biobarnsteen-zuur duurzamer is.

Er lopen onderzoeken om te zien of cellulose als grondstof kan dienen voor de productie van glucose in plaats van maissuikers. Cellulose is een polymeer waarvan je de molecuulformule mag weergeven als $(C_6H_{10}O_5)_n$.

b Geef de reactievergelijking voor de omzetting van cellulose in glucose, voor deze reactie heb je ook water nodig.

Het voordeel van de omzetting van glucose in barnsteen-zuur is dat daarvoor ook CO_2 als beginstof nodig is. Als je de barnsteen-zuurfabriek plaatst naast een bio-ethanol-fabriek, kun je de CO_2 -uitstoot van deze fabriek gebruiken om barnsteen-zuur te maken. Bacteriën maken het barnsteen-zuur in een aantal stappen via een ingewikkeld mechanisme.

c Geef de reactievergelijking van de totaalreactie van het ontstaan van barnsteen-zuur uit glucose en CO_2 . Bij deze reactie ontstaat naast barnsteen-zuur ook water. Je moet even puzzelen om de juiste coëfficiënten te vinden.

Barnsteen-zuur is een zwak zuur. In de oplossing staat een $-COOH$ -groep een H^+ af aan water. De ionisatie van de tweede $-COOH$ -groep mag je verwaarlozen. De K_z van de eerste stap is $6,3 \cdot 10^{-5}$.

d Bereken het percentage barnsteen-zuur dat is geïoniseerd in een 0,20 M oplossing.

C 36

Thiolen, vroeger wel mercaptanen genoemd, bevatten een $-SH$ -groep. Deze $-SH$ -groep kan zuur reageren. Het is een stof met een sterke onaangename geur.

Thiolen speelden ook een belangrijk rol bij het omvangrijke gifschandaal rond het schip de Probo Koala.

Dit schip had op zee een lading nafta illegaal omgezet in benzineproducten. Het geproduceerde afval dat vol thiolen zat is geloosd in Ivoorkust, waar het grote gezondheidsproblemen veroorzaakte voor de bevolking.



8.33 De Probo Koala met de tekst: 'Europa vergiftigt Afrika.'

De stof 2-sulfanylethanol ($HOCH_2CH_2SH$) bevat zo'n $-SH$ -groep, is goed oplosbaar in water en is dan een zwak zuur.

a Leg uit waarom 2-sulfanylethanol goed oplost in water.

b Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als 2-sulfanylethanol in water oplost.

Je hebt een 0,20 M oplossing van dit zuur en je wilt de K_z van dit zuur bepalen. Je meet de pH en die is 5,21.

c Bereken de K_z van 2-sulfanylethanol.

C 37 ★

Daan krijgt van zijn docent een oplossing van een onbekend zuur. De docent heeft 50,0 mmol van het zuur opgelost in 100,0 mL water. Daan moet zien te achterhalen welk zuur het is. Om dit te bepalen meet hij de pH. Deze blijkt 1,48 te zijn.

a Bereken de $[H_3O^+]$.

b Is het zuur een sterk of een zwak zuur?

c Bepaal welk zuur het onbekende zuur is.

Experiment

8.6 Zwak of sterk?

Je ontwerpt een experiment waarin je onderzoekt of een zuur zwak of sterk is. Je gebruikt daarbij de gegevens uit de voorgaande experimenten en voert dit experiment uit met twee gegeven oplossingen.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- de pH berekenen van de oplossing van een sterk zuur;
- de pH berekenen van de oplossing van een zwak zuur;
- de $[H_3O^+]$ berekenen bij een gegeven pH;
- bij gegeven pH de molariteit of de K_z berekenen;
- werken met Binas tabel 49.

Afsluiting

Oefenopdrachten

- 1** Ans heeft in een praktische opdracht de pH van een oplossing van een onbekend zuur bepaald. Ze heeft hiervoor verschillende indicatoren gebruikt en opgeschreven wat de kleur van de oplossing was na het toevoegen van de indicator. Ze maakt nu een verslag, samen met John. Ze heeft in haar schrift opgeschreven:

Kleur fenolrood: geel
Kleur alizariengeel-R: rood

John zegt: 'Dit kan niet kloppen!'

- a** Leg uit waarom John denkt dat deze aantekeningen niet kloppen.
- b** Leg uit wat je denkt dat er verkeerd is gegaan.
- c** Leg uit tussen welke waarden de pH van de oplossing ligt.

- 2** De stof benzeencarbonzuur wordt gebruikt als conserveringsmiddel in levensmiddelen en cosmetica en als desinfectiemiddel in de land- en tuinbouw. Het zuur is pas goed werkzaam als de pH van de benzeencarbonzuuroplossing onder de 4,5 ligt.
- a** Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als benzeencarbonzuur in water is opgelost. Geef de koolstofverbindingen in structuurformules.
 - b** Bereken hoeveel gram benzeencarbonzuur je moet oplossen in 5,0 L water om een pH te hebben van 4,0. Gebruik Binas tabel 49.



3 Inktvraat

Papier bestaat hoofdzakelijk uit cellulose. De cellulose wordt door het water in het papier langzaam afgebroken. Papier kan door de afbraak van cellulose uit elkaar vallen en H_3O^+ -ionen versnellen dit proces.

Inktsoorten uit vroegere tijden bevatten vaak opgeloste ijzer(III)zouten. Door het water in het papier zijn er gehydrateerde Fe^{3+} -ionen, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, aanwezig. Deze gehydrateerde ionen gedragen zich als een zwak zuur. Op plaatsen waar een oude inktsoort op het papier zit, treedt een versnelde afbraak van de cellulose op. Onder de inkt wordt de cellulose vaak zo sterk aangetast dat het papier er helemaal verdwijnt. De inkt vreet zich door het papier heen. Dit verschijnsel staat bekend als inktvraat (figuur 8.34).

- a** Geef de vergelijking van de reactie waarmee je kunt verklaren dat een oplossing die $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ionen bevat, zuur is.

Hoewel papier geen oplossing is, kent men aan papier toch een pH toe. De pH van papier wordt wereldwijd op dezelfde manier gemeten: 2,00 g papier wordt in zeer kleine stukjes geknipt. Deze hoeveelheid materiaal wordt gedurende één uur geëxtraheerd met 100,0 mL gedestilleerd water. Na het verwijderen van de stukjes papier wordt direct de pH gemeten. Met behulp van bovenstaande methode is gemeten dat de pH van het papier van een bepaald boek 5,10 is. Het boek bevatte 250 g papier.

- b** Bereken hoeveel mmol H_3O^+ aanwezig is in het papier van dat boek. Neem aan dat alle H_3O^+ uit het papier is opgelost in de 100,0 mL water en dat alle H_3O^+ in de oplossing afkomstig is van het papier.

Naar: CE vwo 2006-II



8.34 Een bladzijde uit een brief die in 1752 verstuurd werd vanaf het schip de Winchester Gale. In het archief van Middelburg is de brief ernstig aangetast door inktvraat.



4

Rodekoolsap

Rodekoolsap geeft aan een zure oplossing een andere kleur dan aan een basische oplossing en kan daardoor worden gebruikt als zuur-base-indicator. Van zuur naar basisch verandert de kleur geleidelijk. Hieronder wordt de kleurschaal voor rodekoolsap schematisch weergegeven.



8.35

Tim maakt rodekoolsap. Hij neemt een paar bladeren van een rodekool en snijdt deze in kleine stukjes, doet deze stukjes in een bekglas en voegt water toe. Hij laat het mengsel tien minuten zachtjes koken. Nadat het mengsel is afgekoeld, schenkt Tim het door een zeef en vangt het sap op.

- a** Geef de namen van de twee scheidingsmethoden die Tim gebruikt bij de bereiding van het rodekoolsap.

Met het rodekoolsap voert Tim drie proeven uit.

Proef A: Tim doet 5 mL 0,2 M zoutzuur in een reageerbuis, voegt een paar druppels rodekoolsap toe en schudt.

Proef B: Tim doet 5 mL 0,2 M azijnzuur in een reageerbuis, voegt een paar druppels rodekoolsap toe en schudt. Hij vergelijkt de kleur die de oplossing krijgt met de kleur bij proef A.

Proef C: Tim neemt een reageerbuis en doet hier een spatelpuntje bariumhydroxide in. Hij voegt 5 mL water toe en schudt tot al het bariumhydroxide is opgelost. Er ontstaat een basische oplossing. Tim voegt een paar druppels rodekoolsap toe, schudt en ziet dat de kleur groen is. Vervolgens doet Tim deze oplossing in een groot bekglas en voegt water toe totdat de kleur van de oplossing verandert.

- b** Bereken de pH van het mengsel dat ontstaat bij proef A. Neem hierbij aan dat het toevoegen van rodekoolsap geen invloed heeft op de pH.

- c** Leg uit waardoor bij proef B een andere kleur ontstaat dan bij proef A.

- d** Geef de vergelijking voor het oplossen van bariumhydroxide.

- e** Leg uit welke kleurverandering Tim waargenomen kan hebben bij proef C.

Geef je antwoord als volgt:

De kleur verandert van ... naar ..., omdat ...

Bron: CE havo 2011-II

5

Tanden en kiezen zijn bedekt met glazuur. Dit glazuur bestaat vrijwel geheel uit hydroxyapatiet, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. Hydroxyapatiet kun je beschouwen als een mengsel van de zouten calciumfosfaat en calciumhydroxide.

- a** Leid af in welke molverhouding (calciumfosfaat : calciumhydroxide) deze zouten in hydroxyapatiet aanwezig zijn.

Hydroxyapatiet is erg hard, maar het is kwetsbaar als het met zure oplossingen in contact komt. In het volgende tekstfragment wordt de aantasting van hydroxyapatiet door zure oplossingen beschreven.



8.36 Beginnende cariës in de kiezen

Cariës

Een zwak zuur (pH 6-4) zoals melkzuur, dat bacteriën in tandplak uit suikers vormen, diffundeert tussen de apatietkristalletjes de tand binnen, waardoor elke twee protonen (H^+) telkens één calciumion (Ca^{2+}) verdringen. Deze langzame ontkalking maakt de tand in eerste instantie poreus en veroorzaakt uiteindelijk gaten (figuur 8.36).

Erosie

Een sterk zuur (pH 3-1) dat bijvoorbeeld in de vorm van azijn of citrusvruchten in de mond terechtkomt, veroorzaakt geen langzame ontkalking met poreusheid tot gevolg, maar leidt telkens tot aantasting en verlies van een buitenste dunne laag.

Uit: Melk en zuivelproducten in relatie tot tandgezondheid

Melkzuur is de triviale naam van 2-hydroxypropaanzuur. Een voorbeeld van een suiker waaruit melkzuur kan ontstaan, is sacharose. Voor deze omzetting van sacharose tot melkzuur is ook water nodig.

- b** Geef van de omzetting van sacharose tot melkzuur de reactievergelijking in molecuulformules. Neem hierbij aan dat melkzuur de enige koolstofverbinding is die gevormd wordt. Gebruik Binas tabel 66B.

Het tekstfragment geeft als definitie van een sterk zuur: pH tussen 3 en 1. Deze definitie wijkt af van gangbare definities. Volgens die gangbare definities is azijnzuur een zwak zuur.

- c** Laat door berekening zien dat azijn een pH tussen 3 en 1 heeft. Neem aan dat azijn 40 g opgelost azijnzuur per liter bevat en dat de waarde van K_a $1,7 \cdot 10^{-5}$ is.

Naar: CE vwo 2001-I



6

Bloed en de pH

In normale omstandigheden verwijderen longen van volwassen mensen per dag ongeveer $6,0 \cdot 10^2$ g CO_2 -gas uit het bloed. Dit CO_2 is voornamelijk afkomstig van de volledige verbranding van glucose in de lichaamscellen:



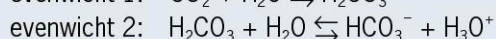
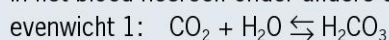
- a** Bereken uit de ontstane hoeveelheid CO_2 hoeveel gram glucose een volwassen mens per dag verbrandt. Neem daarbij aan dat alle CO_2 is ontstaan door verbranding van glucose.

Behalve opgelost CO_2 bevindt zich ook opgelost HCO_3^- in het bloed. De aanwezigheid van CO_2 en HCO_3^- is belangrijk voor het handhaven van een constante pH.

Onder normale omstandigheden is de pH van je bloed 7,40.

- b** Wat is de $[H_3O^+]$ in het bloed onder normale omstandigheden? Geef je antwoord in twee significante cijfers.

In het bloed heersen onder andere de volgende evenwichten:



- c** Geef de evenwichtsvoorwaarde van evenwicht 2.

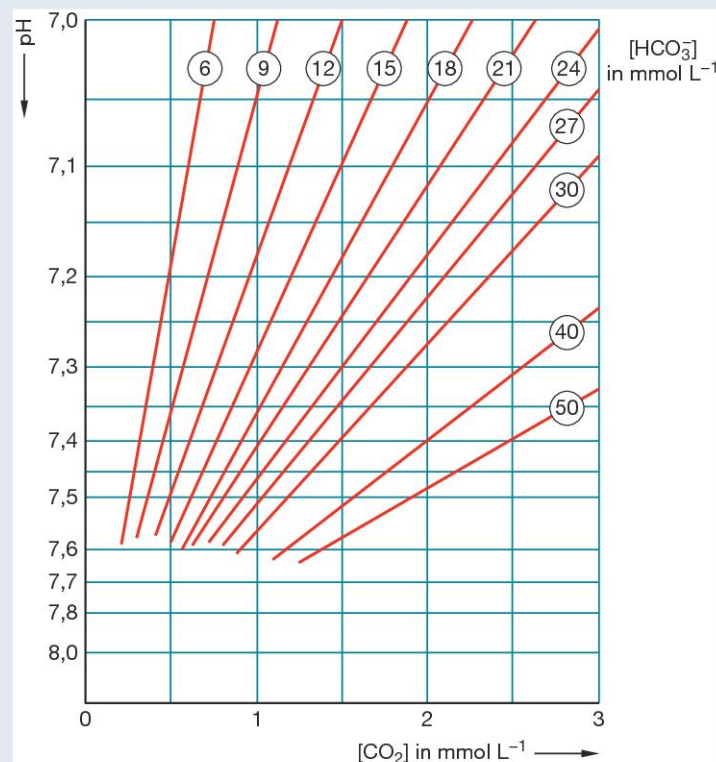
Het diagram in figuur 8.37 geeft bij verschillende concentraties van HCO_3^- het verband weer tussen de concentratie van CO_2 in het bloed en de pH. De omcirkelde getallen in de lijnen geven de concentraties van HCO_3^- weer in mmol per liter. Met behulp van elk van deze lijnen kun je berekenen hoeveel keer zo groot de $[\text{HCO}_3^-]$ is als de $[\text{CO}_2]$ in bloed bij een gegeven pH.

- d** Bereken met behulp van één van de lijnen uit het diagram hoeveel keer zo groot de $[\text{HCO}_3^-]$ is als de $[\text{CO}_2]$ in bloed bij een pH van 7,40.

Wanneer de molverhouding $\text{HCO}_3^- : \text{CO}_2$ in het bloed verandert, verandert de pH. Als de pH van bloed lager is dan 7,35, dan spreek je van acidose en als de pH hoger is dan 7,45, spreek je van alkalose.

Bij hyperventilatie is de afgifte van CO_2 door de longen versneld, terwijl er geen versnelde toevoer van CO_2 is vanuit de lichaamscellen naar het bloed. Bij een patiënt werd bij een aanval van hyperventilatie een $[\text{CO}_2]$ in het bloed geconstateerd van $0,9 \text{ mmol L}^{-1}$. De $[\text{HCO}_3^-]$ was op dat moment 24 mmol L^{-1} .

- e** Leid met behulp van het diagram af of bij deze patiënt sprake is van acidose of van alkalose.



8.37 Diagram pH tegen de concentratie opgelost CO_2

7

pH-Bodemtest

Een goede zuurgraad van de bodem is belangrijk voor de groei en bloei van tuinplanten. Om de zuurgraad van de bodem te bepalen is een pH-bodemtest in de handel. De pH-bodemtest bevat een reageerbuisje, een flesje gedestilleerd water en een aantal testtabletjes. Deze testtabletjes bevatten bariumsulfaat en een mengsel van indicatoren.

Op de verpakking van de test staat het volgende.



8.38 Een bodemtest om zelf de pH van je grond te testen

Gebruiksaanwijzing

- 1 Vul het reageerbuisje met 1 cm grond.
- 2 Voeg hier 2 mL (2,5 cm) gedestilleerd water aan toe.
- 3 Voeg het tabletje toe, sluit het reageerbuisje af met de meegeleverde stop en schud tot het tabletje is opgelost.
- 4 Zet het reageerbuisje enkele minuten weg tot de grond bezonken is en de vloeistof een heldere kleur krijgt.
- 5 Vergelijk de ontstane kleur met de kleuren die op de verpakking staan en bepaal de pH-waarde van de grond.

Op de verpakking (figuur 8.38) zijn vier reageerbuisjes afgebeeld met de volgende kleuren en gegevens:

geel:	pH = 4	sterk zuur
groen:	pH = 5	zuur
groenblauw:	pH = 6	licht zuur
blauw:	pH = 7	neutraal

Voor een goede plantengroei ligt de ideale pH-waarde tussen 5,5 en 7,0.

In de gebruiksaanwijzing staat dat je het reageerbuisje moet schudden tot het tabletje is opgelost. Uit de tekst boven de gebruiksaanwijzing is af te leiden dat dit niet mogelijk is.

a Leg uit waarom het tabletje niet volledig kan oplossen.

Fleur vermoedt dat broomthymolblauw één van de indicatoren is die in het tabletje zit.

b Leg aan de hand van de kleurgegevens op de verpakking uit dat broomthymolblauw niet de enige indicator in de tabletjes kan zijn. Maak gebruik van Binas tabel 52A.

Met de test wordt de pH van tuingrond bepaald op 5,5.

c Bereken de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ in mol L^{-1} in een oplossing met pH = 5,5.

Naar: CE havo 2013-I

Keuzeopdrachten

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

1 Verzuurde spieren

Welke topsporter kent niet de uitdrukking: 'Mijn spieren waren helemaal verzuurd, ik kon niets meer!' Je onderzoekt wat spierversuring is, hoe ze ontstaat en wat je eraan kunt doen.

2 Zwavelzuur

Zwavelzuur is een veelgebruikte grondstof in de industrie. In deze opdracht zoek je drie producten waarvoor zwavelzuur een grondstof is en je zoekt gegevens over de productieprocessen van deze producten.

Overzicht begrippen

Groepen van zuren

Een **organisch zuur** is een stof met een koolstofskelet en een -COOH -groep. Het H-atoom in deze zuurgroep kan worden afgestaan als H^+ -ion. Een **anorganisch zuur** is een stof zonder een koolstofskelet. Sommige **ionen** kunnen als zuur reageren.

Indicatoren

Een indicator is een stof waarmee je kunt bepalen of een oplossing zuur, basisch of neutraal is.

- De indicator **lakmoes** geeft alleen aan of een oplossing zuur of basisch is.
- Met **universeel indicatorpapier** kun je de pH-waarde van een oplossing vaststellen.
- **Oplossingen van indicatoren** geven een pH-gebied aan.

Instabiele zuren

Koolzuur en zwaveligzuur zijn instabiele zuren.

Meerwaardige zuren

Een meerwaardig sterk zuur kan meerdere H^+ -ionen afstaan. Een meerwaardig zwak zuur verliest in water maar één H^+ -ion.

Omslagtraject

Het pH-gebied waarin de indicator van kleur verandert.

pH

Een oplossing is zuur bij een $\text{pH} < 7$, basisch bij een $\text{pH} > 7$ en neutraal bij een $\text{pH} = 7$.

pH berekenen

De pH van een oplossing bereken je met $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$. Bij een gegeven pH bereken je de H_3O^+ -concentratie met $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$.

Significante cijfers bij de pH

Voor pH-berekeningen geldt dat het aantal significante cijfers in de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ gelijk moet zijn aan het aantal decimalen in de pH.

Sterk zuur

Een sterk zuur is opgelost in water volledig geïoniseerd. De notatie van de oplossing van een sterk zuur HZ is: $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{Z}^- (\text{aq})$. Bij een oplossing van een sterk zuur kun je de pH rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing.

Zuurconstante

De zuurconstante is de evenwichtsconstante bij een oplossing van een zwak zuur in water. De zuurconstante geef je weer met K_z . De zuurconstante komt voor een zwak zuur HZ overeen met onderstaande formule:

$$K_z = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{Z}^-]}{[\text{HZ}]}$$

Deze formule gebruik je voor berekeningen aan zwakke zuren.

Zuurgraad of pH

Een getalwaarde die aangeeft of een stof zuur, basisch of neutraal is.

Zwak zuur

Een zwak zuur is opgelost in water slechts gedeeltelijk geïoniseerd. De notatie van de oplossing van een zwak zuur HZ is: $\text{HZ} (\text{aq})$. Bij een oplossing van een zwak zuur kun je de pH berekenen uit de molariteit van de oplossing met behulp van de evenwichtsvoorwaarde.

9 Basen

Inhoud

- 9.1** Basen in water
Experiment:
9.1 Stroomgeleiding bij ammonia en natriumhydroxide-oplossing
- 9.2** Formules van basen
- 9.3** pH berekenen van basen
Experiment:
9.2 Verband $[H_3O^+]$ en $[OH^-]$
- 9.4** Zuur-basereacties
Experimenten:
9.3 Zuur-basereacties 1
9.4 Zuur-basereacties 2
9.5 Zuur-basereacties in de praktijk
9.6 Stoffen analyseren en maken
9.7 Massapercentage kalk in bordkrijt
- 9.5** Zuur-basetitraties
Experimenten:
9.8 Molariteit van zoutzuur bepalen
9.9 Ammoniakgehalte in ammonia
9.10 Kristalwater in kristalsoda
9.11 Zuurstofbleekmiddelen

Afsluiting

Overzicht begrippen



© Noordhoff Uitgevers bv

Het Bogoriameer

Dit vulkanische meer in Kenia bevat hoge concentraties aan Na^+ , HCO_3^- en CO_3^{2-} ionen, afkomstig uit de geisers langs de oever. Daardoor is het meer basisch met een pH van 9,5. De hoge pH is ideaal voor een speciaal soort cyanobacteriën waar de flamingo's van houden.

9



Fresco's

Na jaren van restauratie zijn de fresco's in de Villa der Mysteriën in Pompeï weer te bewonderen. De fresco's werden bedolven bij de uitbarsting van de Vesuvius in het jaar 79. Restauratie van fresco's is geen eenvoudige zaak, want ze worden geschilderd op natte kalk, een basische stof. De pH is bij de restauratie dan ook een belangrijke factor.



Je leert

- eigenschappen van basen en zuren vergelijken;
- het verschil tussen sterke en zwakke basen.

9.1 Basen in water

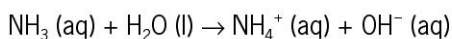


9.1 Verstopte afvoeren kun je met een base ontstoppen.

Basen

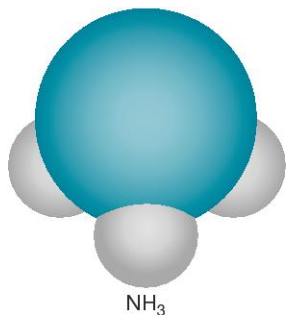
De basische oplossing waarmee de fresco's hierboven worden schoongemaakt heeft een pH groter dan 7. Afvoerontstopper is ook een basische oplossing. Afvoerontstopper is een oplossing van natriumhydroxide en heeft een pH die veel groter is dan 7. Zie figuur 9.1. Net als zure oplossingen blijken basische oplossingen de elektrische stroom te geleiden. De stroomgeleiding van zuren kun je op microniveau verklaren. In water staat het zuur namelijk H^+ -ionen af aan water, waarbij H_3O^+ -ionen ontstaan.

Ammonia is een basische oplossing van ammoniak, een moleculaire stof (figuur 9.2). Moleculaire stoffen geleiden de stroom niet, toch geleidt ammonia wel stroom. Ook hier is een verklaring op microniveau mogelijk. Een ammoniakmolecuul geeft nu geen H^+ -ion af aan water, zoals een zuur, maar neemt juist een H^+ -ion op van water, waarbij een OH^- -ion ontstaat. De reactie die verloopt is:



Alle basische oplossingen bevatten OH^- -ionen zoals alle zure oplossingen H_3O^+ -ionen bevatten. Een **base** is de tegenhanger van een zuur: een zuur kan een H^+ -ion afstaan, een base kan juist een H^+ -ion opnemen.

De aanwezigheid van OH^- -ionen kun je aantonen met een indicator. Rood lakmoespapier kleurt blauw en universeel indicatorpapier geeft groene en blauwe kleuren in een basische oplossing. Met een pH-meter meet je een pH groter dan 7.



9.2 Molecuulmodel van ammoniak, NH_3

Sterke en zwakke basen

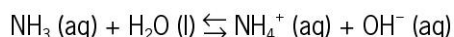
Als je het geleidingsvermogen meet van een 1,0 M natriumhydroxide-oplossing en van 1,0 M ammonia, dan blijkt ammonia veel minder stroom te geleiden.

● Experiment 9.1

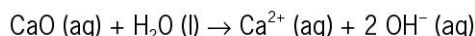


9.3 Bij het Pantheon uit de Romeinse tijd werd al beton gebruikt. Kalk speelt een rol bij de productie van het beton.

In beide oplossingen bevinden zich OH^- -ionen, maar in de ammonia zijn er kennelijk minder OH^- -ionen dan in de natriumhydroxide-oplossing. Ammoniak heeft in water slechts voor een deel ionen gevormd, natriumhydroxide is volledig gesplitst in ionen. Een base die in water in een aflopende reactie OH^- -ionen vormt, is een **sterke base**. Een base die in water in een evenwichtsreactie OH^- -ionen vormt, is een **zwakke base**. Ammoniak is dus een zwakke base:



Als een zwakke base een H^+ -ion opneemt, ontstaat een zwak zuur dat weer een H^+ -ion kan afgeven zoals bij NH_3 en NH_4^+ . Ze vormen een **geconjugeerd zuur-basepaar**. Bij een sterke base, bijvoorbeeld het O^{2-} -ion, krijg je een aflopende reactie met water. Een voorbeeld van een zout dat O^{2-} -ionen bevat is calciumoxide (ongeblyste kalk). Zie figuur 9.3. Ongeblyste kalk reageert als volgt met water:



Het O^{2-} -ion kan niet in water bestaan. Het reageert direct aflopend met water en vormt OH^- -ionen.

Een giftige kikker

Mieren maken mierenzuur om zich te verdedigen of om aan te vallen. Er zijn ook dieren die basische stoffen maken. Zo maakt een bepaalde soort pijlgifkikker de zeer gevaarlijke gifstof batrachotoxine, $\text{C}_{31}\text{H}_{42}\text{N}_2\text{O}_6$, een gifstof die tot de basische stoffen behoort, zie figuur 9.4.

Het gif tast zenuwcellen en spieren aan, wat tot de dood kan leiden. De kikker maakt het gif niet zelf, maar haalt het uit de kevers die hij eet. De kikkers hebben tijdens hun evolutie het vermogen ontwikkeld om zelf geen last te hebben van het gif. Tegelijkertijd lopen ze zo minder risico als prooidier.

Batrachotoxine wordt door indianen in Colombia gebruikt om mee te jagen. Ze schrapen een pijlpunt over de rug van de kikker, die hieraan zijn naam dankt. De LD_{50} -dosis (de dosis die voor 50% van de populatie dodelijk is) bedraagt voor mensen circa 200 μg per kg lichaamsge-

wicht. In zeer lage dosis kan het als een geneesmiddel tegen pijn gebruikt worden.



9.4 Pijlgifkikkers, *Phyllobates terribilis*: een van de giftigste dieren ter wereld

● Opdracht B5

Samenvatting

- Een base is een deeltje dat H^+ -ionen kan opnemen. Een basische oplossing bevat OH^- -ionen.
- Een sterke base reageert aflopend met water, bij een zwakke base treedt met water een evenwichtsreactie op.

Opdrachten

A 1

- a** Wat kun je zeggen over de pH van een ammoniakoplossing?
- b** Welk ion is er in ieder geval in een ammoniakoplossing aanwezig?

B 2

F^- is een zwakke base.

- a** Geef de vergelijking van de reactie van dit ion met water. Geef ook de toestandsaanduidingen.

Het NH_2^- -ion is een sterke base.

- b** Geef de oplosvergelijking van KNH_2 .
- c** Geef de vergelijking van de reactie van NH_2^- met water. Geef ook de toestandsaanduidingen.

B 3

- a** Geef het oplossen van kaliumhydroxide in een oplosvergelijking weer.

De OH^- -ionen reageren als base met water.

- b** Geef de vergelijking van deze reactie. Wat valt je op?

B 4

Voor de opslag van waterstof in een waterstofauto kun je metaalhydriden zoals lithiumhydride, LiH , gebruiken. Als een hydride in contact met water komt, reageert het hydride met water. Bij deze reactie ontstaat de waterstof die nodig is voor de aandrijving van de auto. Er ontstaat ook een basische oplossing.

- a** Leg uit wat de formule van het hydride-ion in lithiumhydride is.
- b** Geef de vergelijking van de reactie van lithiumhydride met water.

B 5

Lees de tekst in het kader 'Een giftige kikker' en beantwoord de volgende vragen.

- a** Geef de vergelijking als batrachotoxine reageert met water.
- b** Leg uit dat batrachotoxine zowel een gif als een medicijn kan zijn.

Stel dat de dodelijke dosis oplost in 5,0 L bloed in je lichaam.

- c** Bereken de molariteit van het gif in het bloed.

C 6 ★

Als je natriumcyanide ($NaCN$) in water oplost, ontstaan er cyanide-ionen.

- a** Geef de vergelijking van het oplossen van natriumcyanide.

Deze cyanide-ionen reageren als een zwakke base met water.

- b** Geef de vergelijking van deze reactie.
- c** Welke deeltjes bevinden zich in de oplossing?

Als je vervolgens een overmaat koper(II)nitraatoplossing toevoegt, ontstaat er een neerslag van koper(II)hydroxide.

- d** Geef de reactievergelijking van het ontstaan van dit neerslag.
- e** Leg uit of er nu nog veel cyanide-ionen in de oplossing aanwezig zijn.

C 7 ⦿

In hoofdstuk 8 heb je de structuurformule van het oxonium-ion, H_3O^+ , geleerd. Dit ion ontstaat als een zuur oplost in water.

- a** Leg uit dat je water bij deze reactie als base kunt beschouwen.
- b** Geef de vergelijking van de reactie die plaatsvindt als de zwakke base methaanamine, CH_3NH_2 , in water oplost.

Experiment

9.1 Stroomgeleiding bij ammonia en natriumhydroxide-oplossing

In dit experiment onderzoek je de stroomgeleiding bij een sterke en een zwakke base.

- Volledige instructie *Chemie Overal online*

Je kunt nu

- uitleggen wat een base is;
- uitleggen wat het verschil tussen een sterke en een zwakke base is;
- de reactie van een sterke base met water en de reactie van een zwakke base met water in een reactievergelijking weergeven.

Vislucht

Als je op een vismarkt werkt, is het nog niet zo eenvoudig om de doordringende geur van je vingers te krijgen. Deze geur wordt veroorzaakt door de base methaanamine, een gas met een zeer lage geurdrempel.

**Je leert**

- de namen en formules van verschillende soorten basen;
- reactievergelijkingen opstellen voor het oplossen van basen in water;
- namen en notaties van basische oplossingen.

9.2 Formules van basen



9.5 De toekomst: een drone die je pizza aflevert? De accu's van sommige drones bevatten de base KOH.

Ionen als base

Er zijn twee soorten basen die je vaak tegenkomt, basische moleculaire stoffen zoals de naar vis ruikende amine hierboven en basische ionen. We kijken eerst naar de basische ionen.

In basische oplossingen komt het OH^- -ion voor. De meest eenvoudige basen zijn daarom zouten met het OH^- -ion als negatief ion, bijvoorbeeld kaliumhydroxide (figuur 9.5). Er zijn echter meer soorten basen. Veel basen zijn negatief geladen ionen. Deze ionen kunnen vrijkomen als een zout oplost in water en ze reageren dan als base.

In Binas tabel 49 staan in de linkerkolom de zuren, gerangschikt naar afnemende sterkte. Het zuurrestion dat naast het zuur staat is een base. De volgorde van de basesterkte is precies omgekeerd aan de zuursterkte. Er geldt voor de kolom met basen:

- De sterkste basen staan rechts onderaan.
- De basen boven H_2O (in de basekolom) zijn alleen in theorie basen, ze reageren niet met water. Cl^- reageert dus niet met water.
- De basen die tussen OH^- en H_2O staan zijn zwak, er treedt een evenwichtsreactie op met water. Het voorbeeld van ammoniak, NH_3 , heb je in de vorige paragraaf gezien.
- De basen die in de tabel onder OH^- staan, zoals O^{2-} in natriumoxide zijn sterk en reageren dus aflopend met water.

Als je Binas tabel 49 goed bekijkt, dan zie je dat er geen zouten in staan, alleen de ionen staan in de tabel. Om te weten of een oplossing van een zout basisch is, moet je dus op



9.6 Natriumfluoride in tandpasta voorkomt tandbederf.

zoek gaan naar het negatieve ion in het zout, niet naar het zout zelf. Vervolgens bepaal je of het zout goed of slecht oplost, bijvoorbeeld met behulp van Binas tabel 45A. Hieronder staat een aantal voorbeelden van basische zouten.

Een goed oplosbaar zout met een sterk basisch ion

Binas tabel 45A geeft aan dat het zout Na_2O reageert met water. In dit zout zit de sterke base O^{2-} . Als het zout in water oplost reageren de O^{2-} -ionen direct aflopend met water. Je schrijft dit in één reactievergelijking op:



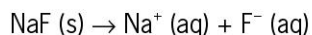
Als een goed oplosbaar zout een sterke base bevat, staat in de vergelijking voor de reactie met water de formule van het zout.

Een slecht oplosbaar zout met een sterk basisch ion

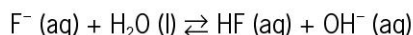
In het slecht oplosbare zout koperoxide, CuO , zitten ook oxide-ionen. Er komen maar weinig ionen in oplossing als je dit zout in water brengt. Er verloopt geen reactie tussen de base en water.

Een goed oplosbaar zout met een zwak basisch ion

Als voorbeeld nemen we het goed oplosbare zout natriumfluoride (figuur 9.6). Als dit zout oplost in water, dan krijg je natriumionen en fluoride-ionen:



De fluoride-ionen staan in tabel 49 als zwakke base, er treedt dus een evenwichtsreactie op:



Bij een goed oplosbaar zout met daarin een zwak basisch ion schrijf je dus twee vergelijkingen op. Eerst een oplosvergelijking van het zout in water, dan een reactievergelijking van het zwak basische ion met water.



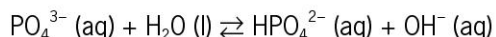
9.7 Het lozen van fosfaatrijk water veroorzaakt eutrofiëring van het oppervlaktewater in de vorm van algengroei of extreme waterplantengroei.

Een slecht oplosbaar zout met een zwak basisch ion

In het slecht oplosbare zout magnesiumfluoride zitten ook fluoride-ionen. Er komen maar heel weinig fluoride-ionen in oplossing als je dit zout in water brengt. Er verloopt geen reactie tussen de base en water.

Meerwaardige basen

Het fosfaation, PO_4^{3-} , is een zwakke base (figuur 9.7), dus onderstaand evenwicht zal naar links liggen.



Het HPO_4^{2-} -ion is ook een base, maar een veel zwakkere base dan PO_4^{3-} en de tweede reactie waarbij het HPO_4^{2-} -ion een H^+ -ion opneemt zal daarom vrijwel niet optreden.

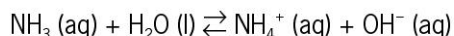
Een **meerwaardige zwakke base** neemt meestal maar één H^+ -ion op van water. De tweede reactie noteer je dus niet. Er zijn negatief geladen ionen die niet basisch zijn. Zo is het waterstofsulfaat (HSO₄⁻) geen base, ondanks de negatieve lading.



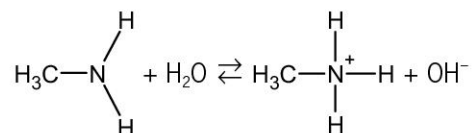
9.8 De ventilatie met gaswassers in veestallen moet voorkomen dat ammoniak in de buitenlucht komt.

Moleculaire stoffen als base

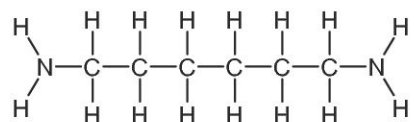
Ammoniak, een gas dat vaak in vrij grote concentraties in veestallen aanwezig is (zie figuur 9.8), is een bekende zwakke base die goed oplosbaar is in water. Dan verloopt de volgende reactie:



Je hebt bij de organische stoffen de aminen leren kennen. Aminen hebben een koolstofskelet met een aminogroep ($-\text{NH}_2$). Een voorbeeld van een amine is methaanamine. Net als bij ammoniak kan de $-\text{NH}_2$ -groep reageren als een zwakke base. De $-\text{NH}_2$ -groep neemt dan een H^+ -ion op.

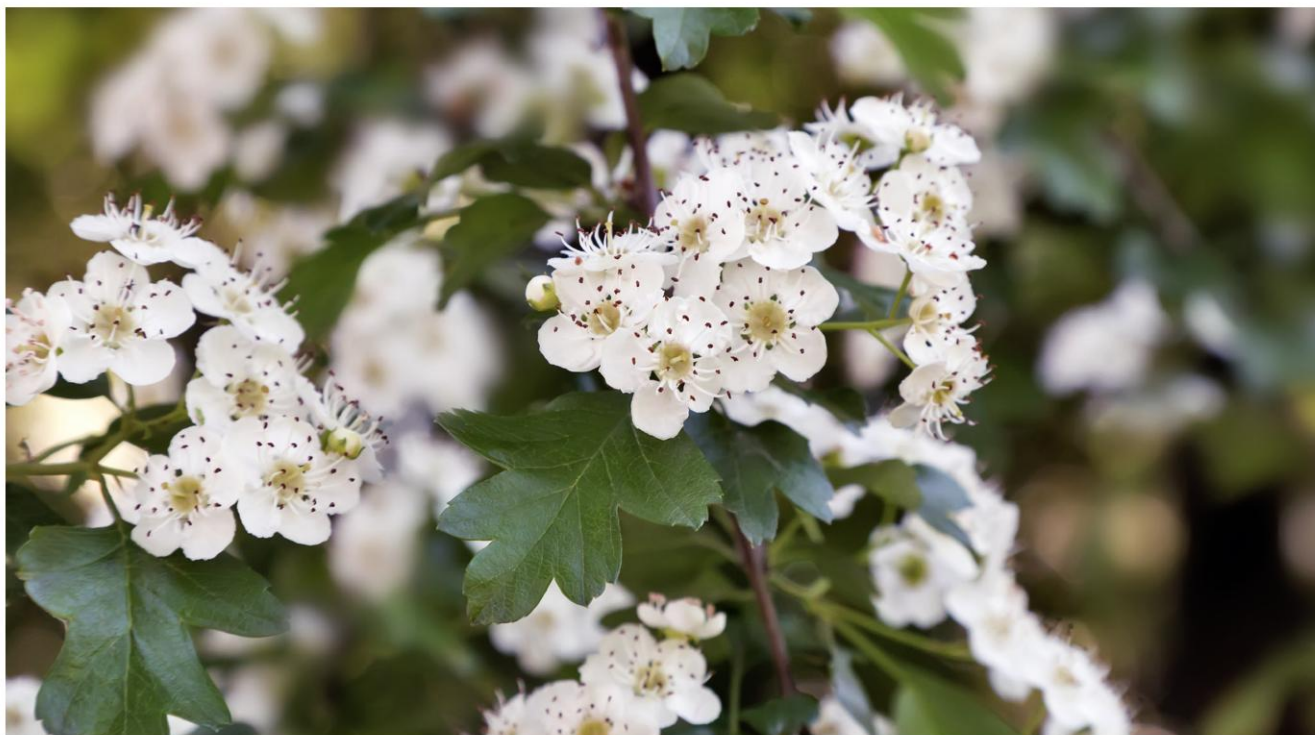


Een amine is een eenwaardige base omdat ze één H^+ -ion kan opnemen (figuur 9.9). Basen die meer dan een H^+ -ion kunnen opnemen zijn **meerwaardige basen**. Bijvoorbeeld diaminen, moleculen met twee aminogroepen, kunnen twee H^+ -ionen opnemen zoals hexaan-1,6-diamine hieronder:



Deze stof is een tweewaardige base. Beide aminogroepen kunnen een H^+ -ion opnemen. Omdat het evenwicht sterk naar links ligt, zal het opnemen van een tweede H^+ -ion in water vrijwel niet optreden.

In tabel 9.10 op de volgende pagina staan enkele belangrijke basen genoemd, deze moet je kennen.



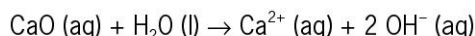
9.9 De base tri-ethylamine veroorzaakt de onaangename geur van de meidoorn.

naam	formule	naam	formule
hydroxide-ion	OH^-	fosfaat-ion	PO_4^{3-}
oxide-ion	O^{2-}	monowaterstoffsosfaat-ion	HPO_4^{2-}
carbonaat-ion	CO_3^{2-}	sulfiet-ion	SO_3^{2-}
waterstofcarbonaat-ion	HCO_3^-	cyanide-ion	CN^-
sulfide-ion	S^{2-}	acetaat-ion	CH_3COO^-
waterstofsulfide-ion	HS^-	ammoniak	NH_3

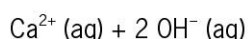
9.10 Namen en formules van een aantal belangrijke basen

Notaties van basische oplossingen

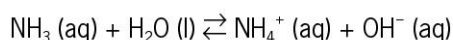
In een oplossing van een sterke base reageert de base aflopend met water. In deze oplossing is de oorspronkelijke base niet meer aanwezig. Het calciumoxide (figuur 9.11) reageert met water:



Er zijn dan geen oxide-ionen in het water aanwezig. Je noteert de oplossing als:



Je mag dus niet schrijven: $\text{O}^{2-} \text{ (aq)}$, omdat deze deeltjes niet in de oplossing voorkomen. In een oplossing van een zwakke base is de oorspronkelijke base nog wel aanwezig. In een oplossing van ammoniak in water:



zijn er in de oplossing zowel NH_3 -moleculen, als NH_4^+ - en OH^- -ionen aanwezig. Omdat bij een zwakke base het evenwicht naar links ligt, zijn er veel meer NH_3 -moleculen in de oplossing dan NH_4^+ - en OH^- -ionen. Je noteert daarom een oplossing van een zwakke base altijd als de oorspronkelijke base, in dit geval dus $\text{NH}_3 \text{ (aq)}$. In tabel 9.12 staan enige belangrijke basische oplossingen genoemd, deze moet je kennen.

naam	notatie
ammonia	$\text{NH}_3 \text{ (aq)}$
natronloog	$\text{Na}^+ \text{ (aq)} + \text{OH}^- \text{ (aq)}$
kaliloog	$\text{K}^+ \text{ (aq)} + \text{OH}^- \text{ (aq)}$
barietwater	$\text{Ba}^{2+} \text{ (aq)} + 2 \text{ OH}^- \text{ (aq)}$
kalkwater	$\text{Ca}^{2+} \text{ (aq)} + 2 \text{ OH}^- \text{ (aq)}$

9.12 Namen en notaties van een aantal belangrijke basische oplossingen

9.11 Bij carbidschieten reageert carbid met water. Naast het explosieve ethyn ontstaat ook de base calciumoxide.



Mandarijntjes uit blik

De mandarijntjes in blik in figuur 9.13 zijn geschild tot losse partjes en de partjes zijn van alle witte velletjes ontdaan. Bij het televisieprogramma de Keuringsdienst van Waarde kwam de vraag binnen hoe de velletjes van de mandarijnenpartjes worden verwijderd. Bij hun onderzoek bezochten de tv-makers een fabriek in Spanje en in China. De verschillen zijn groot. In Spanje staan grote machines die de mandarijntjes vrijwel volledig automatisch schillen en in partjes verdelen. In China zijn er zalen vol medewerkers, die voor een laag loon lange dagen maken om de mandarijnen te schillen (figuur 9.14).

Om de velletjes los te krijgen wordt in beide fabrieken gebruikgemaakt van een geheim proces. Een voedingsdeskundige onthulde dat gebruik wordt gemaakt van

gootsteenontstopper, een oplossing van de base natriumhydroxide.

Deze base maakt de velletjes week. De stevigheid in de velletje ontstaat door esters. Hydroxide-ionen zijn net als watermoleculen in staat de esters te splitsen in carbonzuren en alcoholen. Hierdoor wordt de structuur van de velletjes afgebroken en laten de velletjes gemakkelijk los.

Na deze reactie is de pH veel groter dan 7 waardoor de mandarijntjes nog niet geschikt zijn voor consumptie. De pH wordt verlaagd met zoutzuur. De OH^- -ionen nemen H^+ -ionen van het zoutzuur op waarbij water ontstaat: de basische oplossing wordt neutraal. De partjes worden nog goed nagewassen en met mandarijnensiroop ingeblikt.



9.13 Mandarijntjes in blik



9.14 Het schillen en verdelen in partjes is veel werk.

● Opdracht B15

Samenvatting

- Als een goed oplosbaar zout een sterk basisch ion bevat, reageert het zout direct aflopend met water. Je noteert dan één reactievergelijking. Als een goed oplosbaar zout een zwak basisch ion bevat, noteer je twee reactievergelijkingen, één van het oplossen van het zout en één van de reactie van de base met het water. Als een slecht oplosbaar zout een basisch ion bevat, verloopt er geen reactie met water.
- Aminen zijn zwakke organische basen. Ook ammoniak is een zwakke base.
- Een eenwaardige base kan één H^+ -ion opnemen. Een meerwaardige base kan meerdere H^+ -ionen opnemen.
- Een oplossing van een sterke base noteer je als de ionen die ontstaan door de reactie met water. Een ion als zwakke base noteer je als het oorspronkelijke ion. Een oplossing van een moleculaire stof als zwakke base noteer je als het oorspronkelijke molecuul.

Opdrachten

A 8

Zoek de volgende deeltjes op in Binas en geef steeds aan of gaat om een sterke base, een zwakke base of dat er slechts in theorie een base is.

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| a CN^- | e NH_3 |
| b CH_3NH_2 | f PO_4^{3-} |
| c I^- | g SO_4^{2-} |
| d NH_2^- | |

B 9

Geef van de sterke en zwakke basen in opdracht A8 aan of het gaat om een een-, een twee-, of een driewaardige base.

B 10

- Geef steeds de vergelijking van de reactie van de sterke en zwakke basen uit opdracht A8 met water. Geef ook de toestandsaanduiding.
- Geef bij elk van bovenstaande reacties aan of het reactieproduct verder reageert met water.

B 11

Geef de oplos- en/of reactievergelijking als je een schepje van de onderstaande zouten toevoegt aan water.

- natriumfluoride
- het goed oplosbare natriumhypobromiet (NaBrO)
- magnesiumsulfaat
- calciumoxide
- zilver sulfiet
- calciumchloride

B 12

Geef de notatie van de oplossingen van opdracht B11.

B 13 

- Geef het oplossen van bariumhydroxide in een oplosvergelijking weer.
- Wat is de triviale naam van deze oplossing?
- Welk ander zout kun je ook oplossen om deze oplossing te maken? Geef ook de reactievergelijking.

Je lost van beide zouten 1,00 g op in water en vult de twee oplossing aan tot 500 mL.

- Bereken welke van de twee oplossingen de hoogste concentratie hydroxide-ionen heeft.

B 14 ★

De stof butaan-2-amine is een vloeistof met een sterke visgeur. Ze werd vroeger gebruikt voor de bescherming van aardappelen en fruit tegen schimmels (figuur 9.15). Door dat de aminogroep waterstofbruggen kan vormen is de stof goed oplosbaar in water.

- Geef de structuurformule van butaan-2-amine.
- Teken de waterstofbruggen tussen de butaan-2-amine-moleculen en de watermoleculen. Neem hiervoor twee butaan-2-aminemoleculen en twee watermoleculen. Geef de waterstofbrug met een stippellijntje weer.

Het butaan-2-amine is een zwakke base.

- Geef de vergelijking van de reactie van deze zwakke base met water. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.
- Geef de notatie van de oplossing van butaan-2-amine.



9.15 Butaan-2-amine beschermde aardappelen tegen schimmels.

B 15

Lees de tekst in het kader 'Mandarijnen in blik' en beantwoord de volgende vragen.

- Geef de oplosvergelijking van gootsteenontstopper, natriumhydroxide.
- Hoe heet de oplossing die ontstaat?
- Waarin verschillen de processen in Spanje en China?
- Hoe weet je dat de natriumhydroxide in overmaat is toegevoegd?
- Wat is het voordeel om natriumhydroxide in een hoge concentratie aan de mandarijntjes toe te voegen?

Na de neutralisatie worden de mandarijnenpartjes nog goed nagespoeld.

- Noem een aantal deeltjes die je in het spoelwater kunt terugvinden.

C 16

Fosfaatverbindingen vormen samen met nitraatverbindingen het belangrijkste bestanddeel van kunstmest (figuur 9.16).



9.16 Mest (of gier) uitstrooien op het land. Mest bevat net als kunstmest fosfaten.

Fosfaatverbindingen zijn heel belangrijk voor de voedselvoorziening en daarom wordt er gekeken naar het zo efficiënt mogelijk gebruikmaken van fosfaten. De voorraad fosfaten is namelijk eindig.

a Geef de vergelijking voor het oplossen van natriumfosfaat.

De fosfaationen die vrijkomen kunnen als base met water reageren. De pH van een oplossing is dus hoger dan 7.

b Geef de vergelijking van de reactie van de fosfaationen met water.

c Bedenk een manier om fosfaationen uit de oplossing te verwijderen.

d Verwacht je dat er na het verwijderen van de fosfaationen nog veel waterstoffosfaationen in de oplossing aanwezig zijn?

Ook het zout natriummonowaterstoffosfaat (Na_2HPO_4) is goed oplosbaar in water. De monowaterstoffosfaationen zijn een zwakke base en ze reageren dus met water.

e Geef de (reactie)vergelijkingen van beide processen.

Ten slotte is ook het zout natriumdiwaterstoffosfaat (NaH_2PO_4) goed oplosbaar in water. Ga ervan uit dat het diwaterstoffosfaat een zwakke base is.

f Geef de (reactie)vergelijkingen van beide processen.

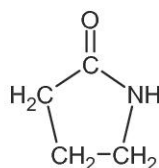
Je hebt in hoofdstuk 8 het diwaterstoffosfaat leren kennen als een zwak zuur.

g Geef de vergelijking van de reactie van het diwaterstoffosfaat (als zwak zuur) met water.

h Wat valt je op als je opgave f en g met elkaar vergelijkt?

C 17 ★

Het web van spinnen is vaak voorzien van kleefstof, zodat een prooi in de webdraden blijft plakken. Gek genoeg gebeurt het maar heel zelden dat mieren op een spinnenweb komen. Je zou verwachten dat mieren die formidabele jagers zijn, wel interesse hebben in de hapjes in het web, of in de spin zelf. Voor de spinnensoort *Nephila antipodiana* (figuur 9.17) is daar nu een verklaring voor. Deze spinnen maken een gif aan, 2-pyrrolidon, een zwakke base:



Dit gif jaagt de mieren weg. De vliegen en andere insecten die vanuit de lucht in het web komen, merken het gif te laat op.

a Geef de reactievergelijking in structuurformules voor de reactie tussen 2-pyrrolidon en water.

De LD50 van 2-pyrrolidon voor mieren is 328 mg kg^{-1} . Een mier weegt ongeveer 5 mg.

b Bereken hoeveel mg 2-pyrrolidon de mier binnenkrijgt bij de LD50-dosis.



9.17 De *Nephila antipodiana* in haar web

Je kunt nu

- aan de hand van Binas tabel 49 bepalen of een base sterk of zwak is;
- de notatie van een oplossing van een sterke base geven;
- de notatie van een oplossing van een zwakke base geven.

Adrenaline

Bij een bungeejump krijg je een paniekervaring. Je lichaam produceert dan adrenaline, een zwakke base. Oplossingen van zwakke basen hebben een pH groter dan 7. Hoe bereken je de pH van zwakke en sterke basen?

**Je leert**

- wat het verband is tussen de pH en de pOH;
- de pH berekenen van een sterke base;
- de pH berekenen van een zwakke base.

9.3 pH berekenen van basen

● Experiment 9.2



9.18 Salamanders in deze poel blijken lichter gekleurd doordat de pH van het water tussen 8 en 10 ligt.

De pOH en het waterevenwicht

Adrenaline heeft invloed op de pH van je bloed. Het is belangrijk dat de pH van je bloed niet te veel verandert. Net als bij zuren gebruik je bij basen de pH om de sterkte van basen aan te geven. In hoofdstuk 8 heb je het verband geleerd tussen de pH en de $[H_3O^+]$ van zure oplossingen:

$$pH = -\log[H_3O^+] \text{ en } [H_3O^+] = 10^{-pH}$$

In basische oplossingen komen OH^- -ionen voor. Je kunt de sterkte van een basische oplossing aangeven met de **pOH**. Het verband tussen de $[OH^-]$ en de pOH is net als bij zure oplossingen de negatieve logaritme van de $[OH^-]$:

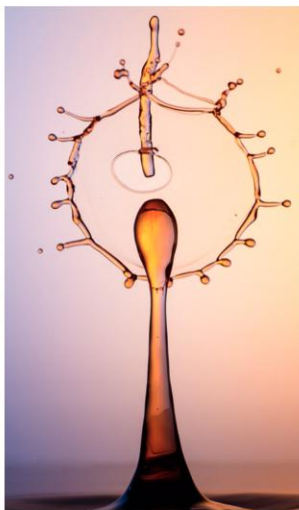
$$pOH = -\log[OH^-] \text{ en } [OH^-] = 10^{-pOH}$$

Hoe hoger de concentratie van de OH^- -ionen, hoe basischer de oplossing en hoe lager de pOH. De sterkte van een basische oplossing wordt meestal niet uitgedrukt met de pOH, maar ook met de pH. Er moet dus een verband zijn tussen de pH en de pOH.

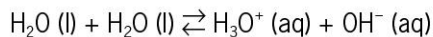
In experiment 9.2 wordt dit verband onderzocht met het volgende resultaat:

$$pH + pOH = 14,00$$

Dit verband blijkt in elke oplossing in water bij kamertemperatuur te gelden, ook in zuiver water. Het verband is het gevolg van het **waterevenwicht**:



9.19 Dit waterbeeldhouwwerk is een met een hogesnelheids-camera gemaakt beeld van een waterbeweging, waardoor er evenwicht lijkt te zijn.



Voor dit evenwicht (figuur 9.19) geldt de volgende evenwichtsvoorwaarde:

$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$$

De concentratie van water staat net als in hoofdstuk 8 niet in de concentratiebreuk omdat ze vrijwel constant is. K_w is de **waterconstante**. De pH van zuiver water is 7,00, dan is $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$. Je kunt nu de waarde van K_w uitrekenen:

$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = (1,0 \cdot 10^{-7})^2 = 1,0 \cdot 10^{-14}$$

Als je links en rechts weer de negatieve logaritme neemt en omdat geldt: $\log(a \times b) = \log a + \log b$, kun je deze formule ook schrijven als:

$$\text{p}K_w = \text{pH} + \text{pOH} = 14,00$$

Als in water extra H_3O^+ -ionen aanwezig zijn, bijvoorbeeld door het oplossen van een zuur, zijn er minder OH^- -ionen aanwezig. Zijn er meer OH^- -ionen aanwezig, dan gaat dit ten koste van het aantal H_3O^+ -ionen. De evenwichtsconstante is afhankelijk van de temperatuur. De waarde van K_w (en $\text{p}K_w$) bij andere temperaturen kun je vinden in Binas tabel 50.

Rekenvoorbeeld 1

Bereken de OH^- -ionenconcentratie van een oplossing met een pH van 12,40.

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14,00$$

$$12,40 + \text{pOH} = 14,00$$

$$\text{pOH} = 1,60$$

$$[\text{OH}^-] = 10^{-1,60} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$$



9.20 $\text{NaC}_2\text{H}_5\text{O}$ is zo'n sterke base dat hij al reageert met vochtige lucht. Deze stof wordt opgelost in ethanol bewaard.

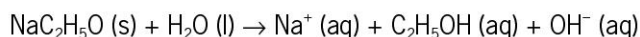
De pH van een oplossing van een sterke base

Om de pH van een basische oplossing te berekenen, moet je eerst de OH^- -concentratie uitrekenen en daarmee bereken je de pOH. Bij een sterke base kun je de OH^- -concentratie rechtstreeks berekenen uit het aantal mol stof dat wordt opgelost, zie rekenvoorbeeld 2.

Rekenvoorbeeld 2

Je lost 2,3 g $\text{NaC}_2\text{H}_5\text{O}$ op in water en vult aan tot 1,0 L. Bereken de pH van de oplossing.

$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$ is een sterke base (figuur 9.20), dus:



$$2,3 \text{ g} \triangleq \frac{2,3 \text{ g}}{68,05 \text{ g mol}^{-1}} = 0,034 \text{ mol NaC}_2\text{H}_5\text{O}$$

Er is dus ook 0,034 mol OH^- . Omdat het volume 1,0 L is, geldt: $[\text{OH}^-] = 0,034 \text{ mol L}^{-1}$.

$$\text{pOH} = -\log 0,034 = 1,47$$

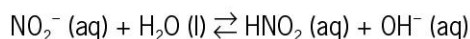
$$\text{pH} = 14,00 - 1,47 = 12,53$$



9.21 Natriumnitriet wordt gebruikt als conserveermiddel in vleeswaren. Het zorgt er bovendien voor dat het vlees roze blijft.

De pH van een oplossing van een zwakke base

Een zwakke base is niet volledig gesplitst in ionen, dus kun je de $[\text{OH}^-]$ niet rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing. Als voorbeeld nemen we een oplossing van natriumnitriet (figuur 9.21). In water treedt het volgende evenwicht op:



In de evenwichtsvoorwaarde laat je net als bij zwakke zuren het water weg:

$$K_b = \frac{[\text{HNO}_2][\text{OH}^-]}{[\text{NO}_2^-]}$$

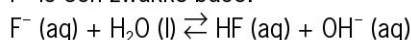
K_b is de **baseconstante**. Deze constante is afhankelijk van de temperatuur. Als je de K_b en de molariteit van de oplossing weet, kun je de OH^- -concentratie uitrekenen. Van een aantal basen kun je de baseconstante vinden in Binas tabel 49. Hoe groter de waarde van K_b , hoe sterker de base. In rekenvoorbeeld 3 wordt de pH berekend van een oplossing van een zwakke base.

Rekenvoorbeeld 3

Je lost 2,3 g NaF op in water en vult aan tot 1,0 L. Bereken de pH.

NaF is een goed oplosbaar zout: $\text{NaF} (\text{s}) \rightarrow \text{Na}^+ (\text{aq}) + \text{F}^- (\text{aq})$

F^- is een zwakke base:



De molariteit van de oplossing is:

$$\frac{2,3 \text{ g}}{41,99 \text{ g mol}^{-1}} = 0,0548 \text{ mol NaF in } 1,0 \text{ L} = 0,0548 \text{ mol L}^{-1}$$

De OH^- -ionenconcentratie is niet gelijk aan de molariteit van de oplossing. Omdat je niet weet hoeveel mol F^- er reageert, stel je deze hoeveelheid gelijk aan x :

	$[\text{F}^-]$	$[\text{HF}]$	$[\text{OH}^-]$
t_0	0,0548	0	0
omgezet	$-x$	$+x$	$+x$
t_{ev}	$0,0548 - x$	x	x

Je kunt deze gegevens invullen in de evenwichtsvoorwaarde, K_b zoek je op in Binas tabel 49.

$$K_b = \frac{[\text{HF}][\text{OH}^-]}{[\text{F}^-]}$$

$$1,6 \cdot 10^{-11} = \frac{x^2}{0,0548 - x}$$

Met de abc-formule vind je: $x = 9,4 \cdot 10^{-7}$

$$\text{pOH} = -\log 9,4 \cdot 10^{-7} = 6,03$$

$$\text{pH} = 14,00 - 6,03 = 7,97$$



9.22 NaF kan ook worden gebruikt om roestvlekken uit kleding of zoals hier een tafelkleed te verwijderen.

Parelmoerwolken

De parelmoerwolken van figuur 9.23 bestaan voor een deel uit kristallen van salpeterzuur. Dit salpeterzuur is ontstaan uit ammoniak dat afkomstig is uit de veeteelt. Ammoniak is een base, maar onder invloed van bliksem reageert ammoniak tot stikstofdioxiden. Deze stikstofdioxiden reageren verder met water tot salpeterzuur. Met regen kan het salpeterzuur in de bodem komen en het zorgt daar voor een verzuring van de bodem. Als zo de pH van de bodem onder de 5,5 daalt, neemt de vruchtbaarheid van de bodem sterk af. Schimmels gedijen goed bij deze lage pH, maar bacteriën die de groei bevorderen juist niet. Om deze zure neerslag tegen te gaan, wordt zo veel mogelijk voorkomen dat ammoniak in de atmosfeer komt.



9.23 Parelmoerwolken in de stratosfeer op 20 km hoogte bestaan gedeeltelijk uit salpeterzuurkristallen.

Mest wordt in weilanden onder de grond gespoten. Stallen hebben luchtwassers die de ammoniak en andere ongewenste stoffen uit de ventilatiekanalen verwijderen, zodat ze niet in de buitenlucht komen (figuur 9.24).

Kleigronden hebben weinig last van zure neerslag omdat kleideeltjes in staat zijn H^+ -ionen weg te nemen. Bij zandgronden is dat veel minder het geval. Vandaar dat vooral bossen in de vorige eeuw veel te lijden hadden van zure regen.

De maatregelen tegen de zure neerslag zijn zo effectief gebleken dat er op dit moment weinig problemen meer zijn op dit gebied.



9.24 Moderne stal met luchtwasser

● Opdracht C27

Samenvatting

- De pOH van een oplossing bereken je met $pOH = -\log[OH^-]$. Bij gegeven pOH bereken je de $[OH^-]$ met $[OH^-] = 10^{-pOH}$. Het verband tussen pH en pOH is:
$$pH + pOH = 14,00$$
- K_w is de waterconstante en heeft een waarde van $1,0 \cdot 10^{-14}$ bij 298 K.
- Bij een oplossing van een sterke base kun je de pOH rechtstreeks berekenen uit de molariteit van de oplossing. Vervolgens kun je de pH berekenen.
- Bij een oplossing van een zwakke base kun je met de evenwichtsvoorwaarde de pOH berekenen en daaruit de pH, als de molariteit en de K_b gegeven zijn. De K_b kun je berekenen als de pH en de molariteit gegeven zijn. De molariteit kun je berekenen als de pH en de K_b gegeven zijn.

Opdrachten

A 18

De OH^- -ionenconcentratie in drie oplossingen a, b en c bedraagt respectievelijk $1,0 \cdot 10^{-3}$, $5,0 \cdot 10^{-3}$ en $4,2 \cdot 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$.

- a Bereken de pOH voor elk van de drie oplossingen.
- b Bereken de pH voor elk van de drie oplossingen.

A 19

Bereken de OH^- -ionenconcentratie in de volgende oplossingen.

- a een ammoniakoplossing met een pOH van 4,0
- b natronloog met een pOH van 1,52
- c kaliloog met een pH van 12,6

B 20

Bereken de pH als 3,6 g natriumhydroxide wordt opgelost in water zodat het volume 150 mL wordt.

B 21

Stel steeds de evenwichtsvoorwaarde op voor oplossingen van de volgende zwakke basen.

- a ammoniak
- b waterstofsulfide-ionen
- c carbonaationen

B 22 

De stof kaliumsulfiet wordt gebruikt als conserveermiddel in bijvoorbeeld wijn en is ook bekend onder E-nummer E225. Zie figuur 9.25. Het zout is goed oplosbaar in water.

- a Geef de oplosvergelijking.



9.25 Sulfiet in wijn

Een van de ionen in de oplossing kan als base reageren.

- b Geef de vergelijking van de reactie als deze base met water reageert.

- c Geef de notatie van de oplossing.

- d Geef de evenwichtsvoorwaarde.

B 23

Je lost steeds 0,10 mol van de volgende stoffen op in 1,0 L water, NH_3 , Na_2O , KIO , NaF . Er ontstaan basische oplossingen.

- a Geef van elke base de vergelijking van de reactie met water.
- b Rangschik de oplossingen van de basen naar opklimmende pOH.
- c Rangschik de oplossingen van de basen naar opklimmende pH.
- d Bereken van elk van de oplossingen de pH.

B 24

De stof hydrazine N_2H_4 is in zuivere vorm explosief. De basische stof is goed oplosbaar in water.

- a Teken de structuurformule van hydrazine.
- b Geef aan of hydrazine een een-, twee- of driewaardige base is.

Een 0,10 M oplossing van hydrazine heeft een pH van 10,74.

- c Is hydrazine een sterke of een zwakke base?
- d Geef de reactievergelijking in molecuulformules van de reactie die verloopt bij het oplossen van hydrazine in water.
- e Bereken de K_b van hydrazine.

B 25 

De pH van een bepaalde ammoniakoplossing is 11,4. Bereken de molariteit van de oplossing.

C 26 

De stof hydroxylamine wordt veel gebruikt bij de synthese van stoffen en heeft als molecuulformule NH_2OH . Hydroxylamine wordt meestal gebruikt in waterige oplossingen. Je kunt de stof maken door stikstofmono-oxide te laten reageren met waterstof.

- a Geef dit proces in een reactievergelijking weer.

Bij verwarming van de stof ontleedt deze explosief. Hierbij komen ammoniak, stikstof en water vrij.

- b Geef de reactievergelijking van de ontleding van hydroxylamine.

Hydroxylamine is een zwakke base, de waarde van de K_b is $1,1 \cdot 10^{-8}$.

- c** Bereken de pH als 4,3 g hydroxylamine wordt opgelost in 250 mL water.
- d** Bereken hoeveel procent van de hydroxylaminemoleculen is geïoniseerd.

C 27

Lees de tekst in het kader 'Parelmoerwolken' en beantwoord de volgende vragen.

Je hebt een ammoniakoplossing waarin $8,5 \text{ g L}^{-1}$ is opgelost.

- a** Bereken de pH van deze oplossing.

Het gevolg van de lozing van ammoniak in het milieu is dat de pH daalt.

- b** Hoe is dat mogelijk, ammoniak is toch een base?

Door zure regen is een akker met oppervlakte van 1,0 hectare (100 bij 100 m) tot een diepte van 10 cm nat geworden. De pH is daardoor gedaald van 7,0 naar 5,5.

- c** Bereken het aantal gram salpeterzuur die dit veroorzaakt kan hebben. Ga er bij de berekening van uit dat er voor het natmaken van een bepaald volume grond een even groot volume regen nodig is.

C 28

Codeïne en novocaïne ★

De stof codeïne ($\text{C}_{18}\text{H}_{21}\text{NO}_3$) is afgeleid van morfine en is een wat zwakkere pijnstiller. Codeïne wordt vaak gebruikt tegen hardnekkige hoest. Zie figuur 9.26.



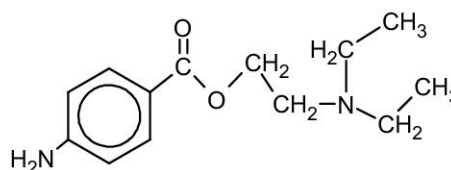
9.26 Codeïnetabletten helpen tegen hoesten.

De lever zet codeïne voor een deel om in morfine, die onder andere zorgt voor de verslavende eigenschappen. Bepaalde mensen missen het enzym dat deze omzetting laat verlopen. Hierdoor werkt codeïne bij deze mensen minder goed.

- a** De pH van een oplossing van 180 mg codeïne in 250 mL water is gelijk aan 9,67. Bereken de K_b van codeïne.

Veel aminen worden voor het gebruik omgezet in de zure vorm, de $-\text{NH}_2$ -groep heeft dan een H^+ opgenomen. Een zout van dit zuurion is vaak stabiel en goed oplosbaar. Zo lossen chloridezouten wel prima op. Het zuurion is dan gebonden aan een chloride-ion.

Novocaïne is een amine en werd vroeger veel gebruikt als verdovend middel. De structuurformule is:



- b** Geef de molecuulformule van novocaïne.
- c** Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als novocaïne in water oplost. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.

Omdat novocaïne niet goed in water oplost en een zwakke base is, ontstaan er maar heel weinig zuurionen.

- d** Bedenk een manier waarop je het novocaïne wel goed kunt omzetten in het zuurion.

Experiment

9.2 Verband $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en $[\text{OH}^-]$

Je onderzoekt welk verband er is tussen de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en de $[\text{OH}^-]$.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- de pOH uitrekenen van de oplossing van een sterke en een zwakke base;
- de $[\text{OH}^-]$ uitrekenen bij een gegeven pOH en de pOH omrekenen in de pH;
- uitleggen wat wordt verstaan onder het waterevenwicht.

Zure regen en kalksteen

De beelden op het dak van de St. Jan in Den Bosch hebben veel te leiden gehad van de zure regen uit de vorige eeuw. De beelden zijn van kalksteen, een base die met zuur reageert. Bij de restauratie zijn sommige beelden vervangen door een meer moderne variant zoals je hiernaast ziet.

**Je leert**

- hoe zuren en basen met elkaar reageren;
- de reactievergelijking van een zuur-basereactie opstellen.

9.4 Zuur-basereacties

● Experiment 9.3 t/m 9.7

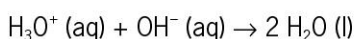


9.27 Koemest bevat veel ammoniak.

Reacties tussen zuren en basen

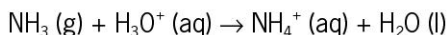
In de vorige eeuw kwamen door vervuiling veel zwaveldioxide en stikstofoxides in de lucht. De pH van de regen lag toen vaak lager dan 5. Die regen taste niet alleen bossen aan, maar ook de uit kalksteen (CaCO_3) bestaande beelden zoals hierboven. Door milieumaatregelen is dat probleem grotendeels opgelost.

In het vorige hoofdstuk heb je geleerd dat zuren H^+ -ionen afstaan en in dit hoofdstuk dat basen H^+ -ionen opnemen. In zure oplossingen komen H_3O^+ -ionen voor en in basische oplossingen OH^- -ionen. Bij een reactie tussen een zuur en base reageren deze ionen met elkaar:



Omdat zuren en basen ook zwak kunnen zijn en/of slecht oplosbaar, is het opstellen van de reactievergelijking vaak ingewikkelder.

Bij koemest komt veel ammoniak (NH_3) vrij (figuur 9.27). Dit is een base die met zoutzuur kan reageren en dan salmiak vormt (figuur 9.28). Ook hier is sprake van een zuur-basereactie.



Je krijgt in water een oplossing van NH_4Cl , salmiak, een bestanddeel van drop.

De reactie tussen een zuur en een base is een **zuur-basereactie**. In een zuur-basereactie geeft een zuur (de donor) steeds één of meer H^+ -ionen af aan een base (de acceptor). Voor het opstellen van de reactievergelijkingen van deze zuur-basereacties maak je gebruik van het stappenplan op de volgende bladzijde.



9.28 Als de damp van zoutzuur in contact komt met ammoniakgas, zie je rook van salmiak ontstaan.

Stappenplan voor het opstellen van de reactievergelijking van een zuur-basereactie

Stap 1: Noteer de formules van alle deeltjes die aanwezig zijn.

Stap 2: Bepaal welk zuur deeltje reageert met welk basisch deeltje.

Stap 3: Stel de reactievergelijking van de reagerende deeltjes op.

Bij **stap 1** moet je letten op de notatie van een oplossing. Een oplossing van een sterk zuur noteer je als de ionen in de oplossing (H_3O^+ en Z^- , het zuurrestion), bij een oplossing van een zwak zuur noteer je de formule van het zuur (HZ). Bovendien zijn bepaalde zouten goed oplosbaar, deze geven dus ionen in een oplossing. Een slecht oplosbaar zout geeft geen ionen in een oplossing. Je noteert dan de formule van het zout.

Bij **stap 2** maak je gebruik van Binas tabel 49. Bij de reactie reageert het sterkste zuur met de sterkste base. Je zoekt dus in de tabel welk deeltje in het reactiemengsel het sterkste zuur is en welk deeltje de sterkste base is. Bij een zuur-basereactie zijn de reactieproducten altijd zwakker dan de beginstoffen.

Bij **stap 3** moet het zuur H^+ -ionen (protonen) overdragen aan de base. Als er een meerwaardige base is en een overmaat zuur, zal de base meer H^+ -ionen opnemen. Als er een meerwaardig zuur is en een overmaat base, zal het zuur al zijn H^+ -ionen afgeven. Een H_3O^+ -ion geeft altijd maar één H^+ af en een OH^- -ion neemt altijd maar één H^+ op. H_3O^+ en OH^- worden dus omgezet tot H_2O .

Voorbeelden van het opstellen van zuur-basereacties

In de volgende voorbeeldkaders staan enkele reactievergelijkingen van zuur-basereacties uitgewerkt met behulp van het stappenplan. Voorbeeld 1 gaat over een sterk zuur met zwakke base, voorbeeld 2 over een zwak zuur met sterke base, voorbeeld 3 over een zwak zuur met zwakke base, voorbeeld 4 over een reactie met een slecht oplosbaar zout en voorbeeld 5 gaat over de reactie van kalkwater met koolstofdioxide. Gebruik Binas tabellen 45, 49 en zo nodig tabel 66.



9.29 Een truck vervoerde geconcentreerd salpeterzuur toen een van de tanks openscheurde en een dikke oranje, corrosieve en zeer gevaarlijke wolk werd geproduceerd.

Voorbeeld 1: Sterk zuur met zwakke base

Je voegt een oplossing van salpeterzuur (figuur 9.29) bij een oplossing van natriumacetaat. Geef de vergelijking van de zuur-basereactie.

Stap 1: Salpeterzuur (HNO_3) is een sterk zuur, notatie: H_3O^+ (aq) en NO_3^- (aq).

Natriumacetaat (NaCH_3COO) is een goed oplosbaar zout, notatie:

Na^+ (aq) + CH_3COO^- (aq). CH_3COO^- is een zwakke base.

In het reactiemengsel bevinden zich:

H_3O^+ (aq), NO_3^- (aq), Na^+ (aq), CH_3COO^- (aq) en H_2O (l)

Stap 2: H_3O^+ is het sterkste zuur, CH_3COO^- is een zwakke base, het is de sterkste aanwezige base.

Stap 3: H_3O^+ (aq) + CH_3COO^- (aq) $\rightarrow$ H_2O (l) + CH_3COOH (aq)

Voorbeeld 2: Sterke base met zwak zuur

Je voegt natronloog toe aan een oplossing van ammoniumchloride. Geef de vergelijking van de zuur-basereactie.

Stap 1: Natronloog is een oplossing van NaOH in water, notatie: Na^+ (aq) en OH^- (aq). Ammoniumchloride is een goed oplosbaar zout, notatie: NH_4^+ (aq) + Cl^- (aq).

In het reactiemengsel bevinden zich:

Na^+ (aq), OH^- (aq), NH_4^+ (aq), Cl^- (aq) en H_2O (l)

Stap 2: NH_4^+ is een zwak zuur, het is het sterkste aanwezige zuur, OH^- is de sterkste base.

Stap 3: NH_4^+ (aq) + OH^- (aq) $\rightarrow$ NH_3 (aq) + H_2O (l)

Voorbeeld 3: Een zwak zuur met een zwakke base

Je voegt ammonia toe aan een oplossing van azijnzuur. Geef de vergelijking van de zuur-basereactie.

Stap 1: Ammonia is een oplossing van ammoniak, NH_3 (aq) is een zwakke base. Azijnzuur is een zwak zuur: CH_3COOH (aq). In het reactiemengsel bevinden zich:

NH_3 (aq), CH_3COOH (aq) en H_2O (l)

Stap 2: CH_3COOH is het sterkste aanwezige zuur. NH_3 is de sterkste aanwezige base.

Stap 3: CH_3COOH (aq) + NH_3 (aq) $\rightarrow$ CH_3COO^- (aq) + NH_4^+ (aq)



9.30 Een meer wordt met kalk ontzuurd.

Voorbeeld 4: Een slecht oplosbaar zout

Je ontkalkt een koffiezetapparaat door een overmaat azijnzuuroplossing in het apparaat te doen. Geef de vergelijking van de zuur-basereactie.

Stap 1: Calciumcarbonaat (kalk, figuur 9.30) is een slecht oplosbaar zout, de notatie is: CaCO_3 (s). Azijnzuur is een zwak zuur, de notatie is: CH_3COOH (aq).

In het reactiemengsel bevinden zich: CaCO_3 (s), CH_3COOH (aq) en H_2O (l)

Stap 2: CH_3COOH is het sterkste aanwezige zuur. De CO_3^{2-} -ionen in CaCO_3 zijn een zwakke base. CaCO_3 is een tweewaardige base en kan dus twee H^+ -ionen opnemen.

Stap 3: Omdat het CO_3^{2-} -ion tweewaardig is, reageren er twee azijnzuurmoleculen. In Binas tabel 49 vind je de formule voor het geconjugeerde zuur van het carbonaation.

$2 \text{CH}_3\text{COOH}$ (aq) + CaCO_3 (s) $\rightarrow$ $2 \text{CH}_3\text{COO}^-$ (aq) + Ca^{2+} (aq) + H_2O (l) + CO_2 (g)



9.31 Beide wasflessen bevatten kalkwater. Er ontstaat een troebeling in de fles waar de uitgeademde lucht door gaat.

Voorbeeld 5: De indicator kalkwater

Kalkwater is een reagens. Het wordt troebel als je er koolstofdioxide door leidt (figuur 9.31). Geef de vergelijking van deze zuur-basereactie.

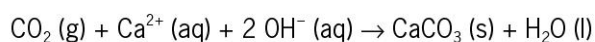
Stap 1: Kalkwater is een oplossing van calciumhydroxide, de notatie is: $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{OH}^{-}(\text{aq})$. Koolstofdioxide in water is een zwak zuur, de notatie is: $\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$. In het reactiemengsel bevinden zich: $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$, $\text{OH}^{-}(\text{aq})$, $\text{CO}_2(\text{aq})$ en $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

Stap 2: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ is het sterkste aanwezige zuur. De OH^{-} -ionen zijn een sterke base. $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ is een tweewaardig zuur en kan dus twee H^{+} -ionen afstaan.

Stap 3: Omdat de CO_3^{2-} -ionen die ontstaan samen met de Ca^{2+} -ionen een slecht oplosbaar zout vormen, komen de Ca^{2+} -ionen ook in de reactievergelijking:



In een reactievergelijking mogen links en rechts niet dezelfde deeltjes staan. De juiste vergelijking wordt dus:



Een lekkende batterij

In een batterij zitten stoffen die met elkaar reageren en daarbij een elektrische stroom afgeven. Alkalinebatterijen bevatten ook kaliumhydroxide in een gelatineoplossing. Als batterijen oud worden, kan er een lek in de mantel ontstaan. De gelatineoplossing komt naar buiten en je voelt dan de kleverige pasta.

Na langere tijd gaat de kaliumhydroxide reageren met koolstofdioxide uit de lucht waarbij de witte aanslag van kaliumcarbonaat ontstaat. In figuur 9.32 zie je het witte zout. Omdat kaliumhydroxide metalen kan aantasten moet je batterijen nooit in een apparaat laten zitten als je het lang niet gebruikt.



9.32 Een lekkende batterij laat een witte aanslag zien.

● Opdracht C39

Samenvatting

- Een zuur-basereactie is een reactie tussen een zuur en een base. Het zuur geeft H^{+} -ionen af aan de base.
- De reactievergelijking van een zuur-basereactie stel je op met een stappenplan.

Opdrachten

A 29

Geef steeds de notatie met fase.

- a** bariumchloride
- b** een oplossing van aluminiumsulfaat in water
- c** waterstofchloride
- d** natronloog
- e** een oplossing van salpeterzuur in water
- f** een oplossing van fosforzuur in water
- g** ammoniak
- h** ammonia

B 30

Geef bij de onderstaande zuren aan hoeveel H^+ -ionen deze in water kunnen afgeven.

- a** HCl
- b** H_2SO_4
- c** HF
- d** H_3PO_4
- e** H_3O^+

B 31

Geef bij de onderstaande basen aan hoeveel H^+ -ionen deze kunnen opnemen.

- a** OH^-
- b** O^{2-}
- c** SO_4^{2-}
- d** PO_4^{3-}
- e** NH_2^-

B 32

Hieronder staan enkele omschrijvingen van stoffen en oplossingen van stoffen met daarbij de notatie.

Geef aan wat er onjuist is en geef de goede notatie.

- a** zoutzuur: HCl (aq)
- b** een oplossing van natriumoxide: $Na^+ (aq) + O^{2-} (aq)$
- c** een oplossing van waterstofcyanide in water:
 $H_3O^+ (aq) + CN^- (aq)$

B 33

Als je aan een oplossing van salpeterigzuur (HNO_2) natronloog toevoegt, treedt er een reactie op.

- a** Geef de notatie van een oplossing van salpeterigzuur.
- b** Geef de notatie van natronloog.
- c** Wat is het sterkste zuur en wat is de sterkste base?
- d** Stel de zuur-basereactie op.

B 34

Als je een overmaat van een waterstofbromide-oplossing (HBr) toevoegt aan een natriumfosfaatoplossing, treedt er een reactie op. Hierbij ontstaat fosforzuur (H_3PO_4).

- a** Geef de notatie van een oplossing van waterstofbromide.
- b** Geef de notatie van een oplossing van natriumfosfaat.
- c** Wat is het sterkste zuur en wat is de sterkste base?
- d** Hoeveel H^+ -ionen kan de sterkste base opnemen en wat betekent het dat er een overmaat zuur aanwezig is?
- e** Geef de zuur-basereactie.

B 35 

Geef de vergelijking voor elk van de zuur-basereacties die tussen onderstaande stoffen plaatsvinden.

- a** zoutzuur en natronloog
- b** een waterstoffluoride-oplossing en kaliloog
- c** een salpeterzuuroplossing en een oplossing van natriumcyanide (NaCN)

B 36 

De stof methaanamine is een base.

- a** Geef de structuurformule van methaanamine en leg uit hoe je kunt zien dat deze stof een base is.
- b** Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als je aan een oplossing van methaanamine zoutzuur toevoegt. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.

B 37 

Geef de vergelijking voor elk van de zuur-basereacties die optreden als je de volgende oplossingen of stoffen samenvoegt.

- a** een overmaat natronloog aan een zwavelzuuroplossing
- b** een overmaat zoutzuur aan een schepje kaliumsulfide
- c** een overmaat kaliloog aan een fosforzuuroplossing
- d** een schepje ijzer(II)oxide aan een overmaat azijnzuuroplossing
- e** barietwater met koolstofdioxide

C 38 

Je voegt barietwater aan verdund zwavelzuur toe. Tijdens het toevoegen meet je de geleidbaarheid.

- a** Geef de reactievergelijking.
- b** Leg uit hoe de stroomgeleiding verandert bij het toevoegen.

C 39

Lees de tekst in het kader 'Een lekkende batterij' en beantwoord de volgende vragen.

Als je een apparaat lang niet gebruikt moet je de batterijen verwijderen.

- Waarom moet dat?
- Geef de reactievergelijking voor de reactie van koolstofdioxide en kaliumhydroxide-oplossing.
- Geef de vergelijking waarbij vast kaliumcarbonaat ontstaat.

C 40

Geef de vergelijking voor elk van de zuur-basereacties die optreden als je de volgende oplossingen of stoffen samenvoegt. Geef ook de vergelijkingen van de neerslagreacties.

- Zilveroxide reageert met een overmaat zoutzuur. Hierbij ontstaat onder andere zilverchloride (AgCl).
- Aan een oplossing van natriumacetaat wordt een oplossing van lood(II)nitraat toegevoegd. Er ontstaat vast lood(II)hydroxide.

C 41

Veel zouten die slecht oplosbaar zijn in water, lossen wel op in een zure oplossing.

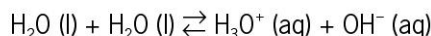
- Leg uit waarom calciumcarbonaat wel oplost in zoutzuur, maar niet in zuiver water (figuur 9.33).
- Geef de vergelijking van de reactie die optreedt als je aan calciumcarbonaat een overmaat zoutzuur toevoegt.
- Waarom lost gips, CaSO_4 , niet op in zuur?



9.33 Marmer (CaCO_3) zoals hier in de kerk van Santa Maria degli Angeli in Rome, mag je niet schoonmaken met zuur, het oppervlak wordt dan ruw.

C 42

In het waterevenwicht wordt een H^+ -ion van het ene watermolecuul overgedragen op het andere:



De pH van zuiver water is bij kamertemperatuur 7,00. Als je de temperatuur verhoogt, wordt de pH lager. Bij 60 °C is de pH van zuiver water gelijk aan 6,50.

- Wat is de pOH en de $\text{p}K_w$ bij deze temperatuur?
- Leg uit of er door het verhogen van de temperatuur meer of minder H_3O^+ -ionen in de oplossing aanwezig zijn.
- Leg uit of de reactie naar rechts een endotherme of een exotherme reactie is.
- Bereken, bij deze temperatuur, de pH van een 0,10 M oplossing van ammoniak. De K_b bij deze temperatuur is gelijk aan $1,9 \cdot 10^{-5}$.

Experimenten

9.3 en 9.4 Zuur-basereacties 1 en 2

In dit experiment voer je een aantal zuur-basereacties uit.

9.5 Zuur-basereacties in de praktijk

Je onderzoekt toepassingen van zuur-basereacties in de praktijk.

9.6 Stoffen analyseren en maken

Je gebruikt zuur-basereacties om stoffen te analyseren en te synthetiseren.

9.7 Massapercentage kalk in bordkrijt

Met een zuur-basereactie bepaal je het massapercentage kalk in bordkrijt.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- aangeven welk deeltje in een zuur-basereactie als zuur en welk deeltje als base reageert;
- de reactievergelijking van een zuur-basereactie opstellen.

Flesvoeding

Als borstvoeding niet mogelijk of moeilijk is, vormt flesvoeding een goed alternatief. De samenstelling van de melk moet wel zo veel mogelijk de moedermelk benaderen. Chemische analyse bepaalt niet alleen welke stoffen in de melk voorkomen, maar ook de hoeveelheid. Een belangrijke eigenschap van goede voeding is bijvoorbeeld dat er voldoende eiwit in zit.



Je leert

- de molariteit van een oplossing bepalen met een zuur-basetitratie;
- de juiste indicator kiezen bij een zuur-basetitratie;
- hoe nauwkeurig verschillende soorten glaswerk zijn;
- wat het verschil is tussen een toevallige en een systematische fout.

9.5 Zuur-basetitraties



9.34 Een leerling voert een titratie met een buret uit.

Kwantitatieve analyse

Het onderzoek naar het eiwitgehalte van babyvoeding heeft als laatste stap een **zuur-basetitratie** waarbij een onbekende hoeveelheid base reageert met zoutzuur met bekende molariteit. Als je bijvoorbeeld 10 of 25 mL natronloog hebt met de te onderzoeken molariteit, druppel je zoutzuur toe, totdat net al de aanwezige base heeft gereageerd met het zuur. Door te bepalen hoeveel zoutzuur je toevoegt, kun je nu de molariteit van het natronloog berekenen. Hoe je dit berekent staat in stappen uitgewerkt in het rekenvoorbeeld op de bladzijde hiernaast. Een zuur-basetitratie is een kwantitatieve analyse, je doet metingen om zo nauwkeurig mogelijk hoeveelheden te bepalen.

Zure en basische oplossingen zijn meestal kleurloos, waardoor je niet kunt zien wanneer alle base heeft gereageerd. Daarvoor voeg je een indicator toe aan de basische oplossing met onbekende molariteit. Als al de base heeft gereageerd, zijn er geen zure en geen basische deeltjes meer in de oplossing. De pH is dus 7,00 en zowel de $[H_3O^+]$ als de $[OH^-]$ is dan heel klein, namelijk $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$. Als je aan dit reactiemengsel nog één extra druppel zoutzuur toevoegt, gaat de pH daardoor meteen naar 5. De verandering van de pH kun je waarnemen met de indicator. Wanneer je een indicator kiest met een **omslagtraject** tussen pH 6 en 8 zal, als alle base heeft gereageerd, de pH van de oplossing in het omslagtraject van de indicator liggen. Je voegt dus zure oplossing toe, totdat de kleur van de basische oplossing die je titreert overeenkomt met de kleur in het omslagtraject van de indicator. Een indicator die je kunt gebruiken is bijvoorbeeld broomthymolblauw. Het punt waarop alle basische deeltjes hebben gereageerd met het zuur is het **equivalentiepunt**.

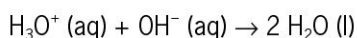


9.35 Gebruik van een pipet. Je kunt hiermee zeer nauwkeurig een bepaalde hoeveelheid van de te titreren oplossing nemen.

Rekenvoorbeeld

Je titreert 10,00 mL natronloog van een onbekende molariteit met 0,1050 M zoutzuur. Voor deze titratie is 13,36 mL zoutzuur nodig om het equivalentiepunt te bereiken. Bereken de molariteit van het natronloog.

Stap 1: Je stelt de vergelijking op van de reactie die tijdens de titratie verloopt:



Stap 2: De toegevoegde 13,36 mL 0,1050 M zoutzuur bevat $0,01336 \times 0,1050 = 1,403 \cdot 10^{-3}$ mol H_3O^+ -ionen.

Er was dus voor het toevoegen ook $1,403 \cdot 10^{-3}$ mol OH^- -ionen aanwezig.

Stap 3: Dit zit in een volume van 10,00 mL, de molariteit van het natronloog is:

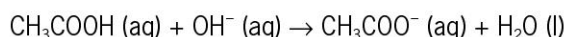
$$\frac{1,403 \cdot 10^{-3} \text{ mol}}{0,01000 \text{ L}} = 0,1403 \text{ mol L}^{-1}$$

● Experimenten 9.8 t/m 9.11

Titratie van een zwak zuur of base

Titreer je een sterk zuur met een sterke base, dan ligt het equivalentiepunt bij pH 7. Er is dan geen zuur of base meer in de oplossing aanwezig. Bij een titratie van een zwak zuur met een sterke base, of een sterk zuur met een zwakke base is dit niet het geval.

Als je bijvoorbeeld azijnzuur (ethaanzuur) laat reageren met natronloog, dan treedt de volgende reactie op:



Bij het equivalentiepunt is al het azijnzuur omgezet in acetaationen (ethanoaationen). Je hebt dan een oplossing met CH_3COO^- . Het acetaation is een zwakke base, er zal dus wat OH^- in de oplossing zitten. De pH is hierdoor iets hoger dan 7.

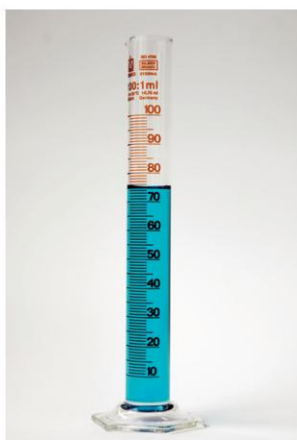
Algemeen geldt dat als je een zwak zuur titreert met een sterke base, de pH bij het equivalentiepunt boven de 7 ligt. Je kiest dan een indicator met een omslagtraject boven de 7, bijvoorbeeld fenolftaleïne. Titreer je een zwakke base met een sterk zuur, dan ligt de pH bij het equivalentiepunt onder de 7. Als indicator kies je dan bijvoorbeeld methylrood met omslagtraject 4,8 – 6,0.



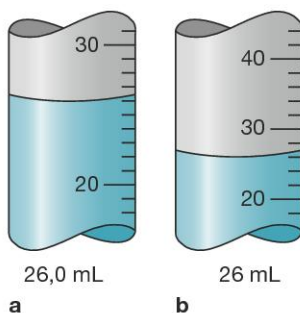
9.36 In grote laboratoria worden titraties niet handmatig uitgevoerd zoals in de klas, maar beschikt men over titratieautomaten zoals hier op de foto.



9.37 Maatkolf. Je zorgt ervoor bij het maken van de oplossing dat de onderkant van je vloeistofspiegel (de meniscus) precies op de maatstreep van de kolf staat.



9.38 Maatcilinder



9.40 De schaalverdeling bij (a) geeft een nauwkeuriger resultaat dan bij (b).

Nauwkeurigheid van het glaswerk

Titrezen is een kwantitatieve analysemethode. Als je kwantitatief werkt, stel je hoge eisen aan de nauwkeurigheid van het glaswerk dat je gebruikt.

Voor het afmeten van 10,00 mL natronloog gebruik je een volpipet (figuur 9.35). Een volpipet levert een volume met een standaardgrootte, bijvoorbeeld 10,00 mL of 25,00 mL. Om het zoutzuur toe te druppelen gebruik je een buret (figuur 9.34). De toegevoegde 13,36 mL zoutzuur uit het voorbeeld lees je na het bereiken van het equivalentiepunt zo nauwkeurig mogelijk af.

Als je een vaste stof oplost voordat je gaat titreren, maak je gebruik van een maatkolf (figuur 9.37). De maatkolf heeft een exact bekend volume. Als de onbekende oplossing te geconcentreerd is en het risico bestaat dat er meer dan een buret (50,00 mL) moet worden toegevoegd, maak je een verdunding met de maatkolf.

Hoe je zo nauwkeurig mogelijk kunt werken met een buret, een pipet en een maatkolf kun je lezen in een uitgebreide titratiehandleiding op Chemie Overal online.

Als je een volume niet zo nauwkeurig hoeft af te meten kun je een maatcilinder gebruiken (figuur 9.38). Hoewel op een bekersglas en erlenmeyer vaak ook volumestreepjes staan, zijn deze zo onnauwkeurig dat je ze nooit kunt gebruiken om volumes af te meten.

Toevalige en systematische fouten

Om de dichtheid van alcohol experimenteel te bepalen, meet je van een volume alcohol de massa. De dichtheid bereken je door de massa te delen door het volume. In tabel 9.39 staat een overzicht met waarnemingen van een onderzoek.

	volume (mL)	massa (g)	dichtheid (g mL ⁻¹)	gemiddelde dichtheid (g mL ⁻¹)
maatcilinder	22	18,6	0,85	0,83
	25	20,6	0,82	
	27	22,4	0,83	
buret	22,60	18,0	0,796	0,799
	23,79	19,0	0,799	
	24,54	19,7	0,803	

9.39 De dichtheid van alcohol

Als je deze meetresultaten beter bekijkt, vallen er twee dingen op.

- 1 De spreiding in de berekende dichtheden is bij het gebruik van een maatcilinder aanmerkelijk groter dan bij het gebruik van de buret. Die spreiding bij de maatcilinder komt doordat je het volume niet nauwkeurig kunt aflezen. Je spreekt hier van een **toevalige fout**.
- 2 De dichtheid van alcohol bij 20 °C is volgens Binas 0,80 g mL⁻¹. De gemiddelde dichtheid, bepaald met de buret (0,799 g mL⁻¹), komt hiermee overeen. Een bepaling met de maatcilinder levert een gemiddelde dichtheid op die afwijkt (0,83 g mL⁻¹). De afwijking kun je toeschrijven aan een onnauwkeurige hoogte van de maatstrepen op de niet-geijkte maatcilinder. Dit leidt tot een **systematische fout** bij het aflezen die is veroorzaakt door onnauwkeurige apparatuur.

Met een buret is dus nauwkeuriger een volume vloeistof af te meten dan met een maatcilinder, zie figuur 9.40. Naarmate de schaalverdeling gedetailleerder is, lees je nauwkeuriger af. De (on)nauwkeurigheid van het gebruikte glaswerk heeft daarom consequenties voor het aantal cijfers waarin je berekende getallen moet noteren (tabel 9.39 en figuur 9.40).

Chemisch lab

In figuur 9.41a zie je een chemisch lab zoals het er vijftig jaar geleden uitzag. Figuur 9.41b geeft een indruk van een modern lab. Wat meteen opvalt, is dat vroeger de proeven gewoon op de labtafel in de zaal werden uitgevoerd. Tegenwoordig gebeurt vrijwel alles in de zuurkast. De zuurkast wordt afgezogen, zodat je als chemicus geen last krijgt van giftige gassen die bij de experimenten een rol kunnen spelen.

In het verleden was de afvoer van de gootsteen bestand tegen de meest agressieve chemicaliën, die immers rechtstreeks in het riool werden gespoeld. In een modern lab, net als op school, worden afvalstoffen verzameld en zo mogelijk gerecycled of onschadelijk gemaakt.

Een voorbeeld van een experiment dat in de zuurkast moet worden uitgevoerd is de kjeldahlbepaling. Met deze bepaling kun je het eiwitgehalte meten in bijvoorbeeld melk, zie de openingstekst van de paragraaf.



9.41a Historisch chemisch lab

Omdat eiwit de enige bron van stikstof is, wordt in de kjeldahlbepaling de hoeveelheid stikstof bepaald. Bij de bepaling wordt de melk eerst verhit in geconcentreerd zwavelzuur, waarbij alle stoffen in de melk worden afgebroken tot koolstofdioxide, water en ammoniumsulfaat. Ammoniumsulfaat reageert vervolgens met een overmaat natronloog tot ammoniak, die via destillatie in een oplossing van een overmaat boorzuur (H_3BO_3) wordt geleid. De hoeveelheid van het driewaardige boorzuur is bekend en het boorzuur dat niet heeft gereageerd met ammoniak wordt getitreerd met natronloog met een bekende concentratie.

Na de titratie weet je hoe groot de overmaat boorzuur was en hoeveel boorzuur met de ammoniak heeft gereageerd. Zo weet je dus ook de hoeveelheid stikstof in het oorspronkelijk monster.



9.41b Een modern chemisch lab bevat veel zuurkasten.

● Opdracht C47

Samenvatting

- Als je de molariteit van een zure of basische oplossing wilt bepalen, kun je gebruikmaken van een zuur-basetitratie. Het equivalentiepunt is het eindpunt van de titratie.
- Als je een zwak zuur met een sterke base titreert, ligt de pH bij het equivalentiepunt boven de 7. Als je een zwakke base met een sterk zuur titreert, ligt de pH bij het equivalentiepunt onder de 7. Titreer je een sterk zuur met een sterke base, dan ligt de pH bij het equivalentiepunt rond 7.
- Bij titreren is de nauwkeurigheid van het glaswerk belangrijk.
- Door onnauwkeurigheden bij analyse ontstaan toevallige en systematische fouten.

Opdrachten

A 43

Je hebt met een pipet 25,00 mL zoutzuur in een erlenmeyer gedaan. Je wilt de molariteit van deze oplossing bepalen. Je voert een titratie met 0,0945 M natronloog uit. De beginstand van je buret is 12,45 mL. Bij het omslagtraject is de eindstand van de buret 24,72 mL.

- Bereken hoeveel milliliter natronloog je hebt toegevoegd.
- Bereken hoeveel mol natronloog je hebt toegevoegd.
- Geef de vergelijking van de reactie die tijdens de titratie verloopt.
- Bereken hoeveel mol zuur in de oorspronkelijke oplossing aanwezig was.
- Bereken de molariteit van het zoutzuur.

B 44

Graham krijgt de opdracht om het gehalte (g L^{-1}) ammoniak in ammonia te bepalen. Hij krijgt een fles ammonia en meet 10,00 mL af. Hij titreert met 0,501 M zoutzuur tot kleuromslag. Als indicator gebruikt hij methylrood.

- Wat is de kleur van de ammonia als er een paar druppels methylrood worden toegevoegd?
- Welke kleur heeft de oplossing in het omslagtraject?
- Geef de vergelijking van de reactie die verloopt.

Graham heeft de volgende resultaten gekregen:

meting	beginstand buret (mL)	eindstand buret (mL)	verschil (mL)
1	0,54	12,65	12,11
2	12,65	28,88	16,23
3	28,88	41,00	12,12

Zoals je ziet is het resultaat van de tweede meting nogal afwijkend. Een meting die erg afwijkt noem je wel een uitbijter. Bij het rekenen neem je deze uitbijter niet mee.

- Leg uit of bij een uitbijter sprake is van een systematische of toevallige fout.
- Bereken hoeveel milliliter Graham gemiddeld heeft toegevoegd en bereken vervolgens hoeveel mol ammoniak er in de ammonia aanwezig is.
- Bereken het gehalte ammoniak in ammonia in gram per liter.

B 45

Voor de bepaling van het citroenzuurgehalte in citroensap kun je het volgende voorschrift gebruiken.

Pers een citroen uit en zeef het sap. Pipetteer 10,00 mL van het gezeefde sap in een 100 mL maatkolf. Vul met water aan tot de streep en homogeniseer. Pipetteer 10,00 mL van het verdunde citroensap in een erlenmeyer en titreer dit met natronloog met een molariteit rond de 0,1 M. Gebruik thymolblauw als indicator. Je voert deze proef uit. Je hebt gemiddeld 9,20 mL 0,102 M NaOH-oplossing nodig voor de titratie.

- Teken de structuurformule van citroenzuur.

Citroenzuur is een driewaardig zuur.

- Geef de vergelijking van de reactie die optreedt. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen. Ga ervan uit dat het citroenzuur alle drie de H^+ -ionen verliest.
- Bereken hoeveel gram citroenzuur in 1,00 liter van dit citroensap zit.

Als je methylrood gebruikt in plaats van thymolblauw krijg je een andere uitkomst.

- Leg uit of je uitkomst nu hoger of lager is dan je antwoord bij c.
- Leg uit of er nu sprake is van een toevallige fout of van een systematische fout.

B 46

Krijtjes bestaan voor ongeveer de helft uit calciumcarbonaat, de rest is calciumsulfaat en bindmiddel. Op de volgende manier bepaal je het gehalte calciumcarbonaat. Je maalt het krijt fijn en weegt in een erlenmeyer 0,722 g poeder af. Voeg 50,0 mL 0,100 M H_2SO_4 -oplossing aan het krijt toe; dit is een overmaat. Verhit nu de erlenmeyer met het ontstane witte papje en houd de vloeistof een paar minuten tegen de kook aan. Titreer de afgekoelde overmaat zuur terug met een NaOH-oplossing. Gebruik fenolftaleïne als indicator. Voor de titratie is 9,30 mL 0,0996 M NaOH-oplossing nodig.

- Geef de vergelijking van de reactie van calciumcarbonaat met een zwavelzuuroplossing.

Tijdens de titratie reageert het toegevoegde natronloog met de overmaat zwavelzuur.

- Bereken hoeveel mol natronloog er reageert.
- Bereken hoeveel mol zwavelzuur er was overgebleven.
- Bereken hoeveel mol calciumcarbonaat met zwavelzuur heeft gereageerd.
- Bereken het massapercentage calciumcarbonaat in het gebruikte krijt.

C 47

Lees de tekst in het kader 'Chemisch lab' en beantwoord de volgende vragen.

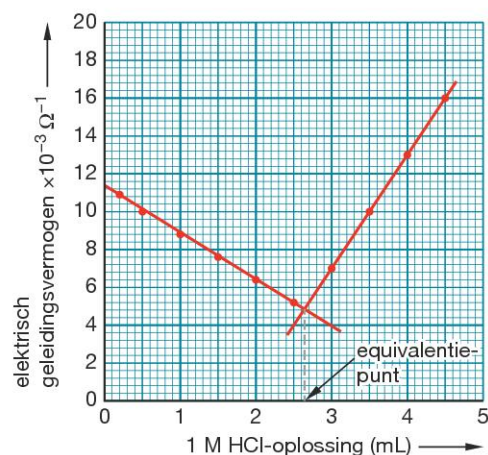
- Geef de vergelijking van de reactie tussen ammoniumsulfatoplossing en natronloog.
- Geef de vergelijking van de reactie tussen ammoniak en het driewaardige boorzuur.
- Geef de vergelijking van de reactie tussen boorzuuroplossing en natronloog.

Bij een kjeldahlbepaling wordt 98,5 g melk onderzocht. Er wordt gebruikgemaakt van 50,00 mL 0,500 M boorzuur. De overmaat boorzuur wordt getitreerd met 42,82 mL 0,850 M natronloog.

- Bereken het massapercentage stikstof in deze melk.

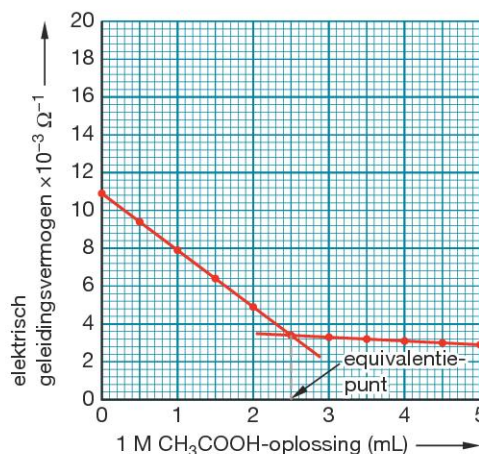
C 48 ★

Een titratie waarbij het equivalentiepunt wordt bepaald door meting van het elektrisch geleidingsvermogen noemt men een conductometrische titratie. Het resultaat van de titratie van natronloog met zoutzuur zie je in figuur 9.42. Uit zo'n diagram is het equivalentiepunt gemakkelijk af te lezen.



9.42

Figuur 9.43 geeft het verloop van het elektrisch geleidingsvermogen weer tijdens de titratie van natronloog met een azijnzuuroplossing. Algemeen geldt dat het elektrisch geleidingsvermogen afhangt van de ionconcentratie en van de beweeglijkheid van de aanwezige ionsoorten. Voor OH^- -ionen (en ook voor H_3O^+ -ionen) geldt dat deze extra beweeglijk zijn.



9.43

In Binas tabel 41 kun je per ionsoort vinden wat de geleidbaarheid is.

- Geef de vergelijking van de reactie tussen een NaOH-oplossing en een HCl-oplossing.
- Geef de vergelijking van de reactie tussen een NaOH-oplossing en een CH_3COOH -oplossing.
- Geef een verklaring voor de daling van het elektrisch geleidingsvermogen tot aan het equivalentiepunt tijdens de beide titraties.
- Verklaar waardoor het elektrisch geleidingsvermogen in figuur 9.42 na het equivalentiepunt sterk stijgt, terwijl het in figuur 9.43 vrijwel constant blijft.

Experimenten

9.8 Molariteit van zoutzuur bepalen

Je bepaalt de molariteit van zoutzuur door een titratie met natronloog.

9.9 Ammoniakgehalte in ammonia

Je onderzoekt het gehalte ammoniak in huishoudammonia.

9.10 Kristalwater in kristalsoda

Je onderzoekt hoeveel kristalwater kristalsoda bevat.

9.11 Zuurstofbleekmiddelen

Je onderzoekt kwantitatief het wasmiddel Ecover.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- met een gegeven voorschrift een zuur-basetitratie uitvoeren;
- met behulp van een titratie de molariteit van een oplossing of het gehalte van een stof in een mengsel berekenen.

Afsluiting

Oefenopdrachten



9.44 Natriumamide wordt gebruikt bij de productie van hydrazine, een raketbrandstof.

1 Natriumamide

Natriumamide (NaNH_2) is een stof die heftig reageert met water (figuur 9.44). De stof wordt gemaakt door natrium met ammoniakgas te laten reageren. Naast natriumamide komt nog één andere stof vrij.

a Geef dit proces in een reactievergelijking weer.

Dat natriumamide met water reageert, is goed te verklaren. De amide-ionen zijn een sterke base. Na de reactie met water komen er ammoniakmoleculen vrij. Deze zullen ook met water reageren.

b Geef in twee aparte reactievergelijkingen de beide reacties weer die optreden als natriumamide in water wordt gebracht.

De amide-ionen zijn dus een tweewaardige base.

c Bereken de pH van de oplossing die ontstaat als 3,4 g natriumamide in water wordt gebracht en wordt aangevuld tot 450 mL water.

2 Oxaalzuur

Je krijgt van je docent de opdracht om het gehalte oxaalzuur ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) in een oplossing te bepalen. Dit doe je door te titreren met natronloog met een molariteit van 0,0950 M. Je meet 25,00 mL oxaalzuuroplossing af en doet dit in een erlenmeyer. Vervolgens titreer je. Het blijkt dat je gemiddeld 22,71 mL natronloog nodig hebt.

Bereken het gehalte (in g L^{-1}) van het oxaalzuur in de oorspronkelijke oplossing.

3 Fluoride in tandpasta

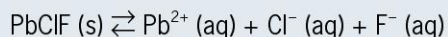
Twee leerlingen bepalen voor hun profielwerkstuk het fluoridegehalte van een bepaald merk tandpasta. Ze hebben op internet een bepaling gevonden waarbij het aanwezige fluoride als PbClF wordt neergeslagen. Door daarna de massa van het PbClF te wegen, kunnen ze het fluoridegehalte in de tandpasta berekenen.

De leerlingen wegen een hoeveelheid tandpasta af en lossen dit op in verdund salpeterzuur. Terwijl ze dit doen, nemen ze een gasontwikkeling waar. Omdat in de tandpasta calciumcarbonaat aanwezig is als polijst- en schuurmiddel, vermoeden ze dat dit gas koolstofdioxide is. Ze leiden het gas daarom door kalkwater.

a Geef de vergelijking van de reactie die verloopt als koolstofdioxide door kalkwater wordt geleid. Geef de waarneming die de leerlingen zullen doen.

De oplossing die is ontstaan na de reactie van tandpasta met salpeterzuur wordt enige minuten verhit om het nog opgeloste koolstofdioxide te verwijderen. Daarna brengen de leerlingen de oplossing op een pH-waarde van ongeveer 5 door het toedruppelen van natronloog. Vervolgens voegen ze een NaCl-oplossing toe, waarna ze onder voortdurend roeren een $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ -oplossing toevoegen.

Tijdens het toedruppelen ontstaat een suspensie doordat zich een heterogeen evenwicht instelt:



Doordat een overmaat NaCl-oplossing en een overmaat $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ -oplossing is toegevoegd, is de $[\text{F}^{-}]$ in de vloeistof verwaarloosbaar klein.

b Geef de evenwichtsvoorwaarde voor dit evenwicht.

c Leg met behulp van de evenwichtsvoorwaarde uit dat het gebruik van een overmaat NaCl-oplossing en een overmaat $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ -oplossing ervoor zorgt dat de concentratie opgeloste F^{-} verwaarloosbaar klein wordt.

De leerlingen hebben een hoeveelheid tandpasta van 20,0143 g afgewogen en het fluoride omgezet in PbClF . De verkregen suspensie wordt gefiltreerd over een vooraf gedroogd filter. De massa van het filter is bepaald: 7,1842 g.

Het neerslag van PbClF wordt in het filter verzameld en gewassen. Hierna wordt het filter gedroogd en met het daarin verzamelde neerslag gewogen: 7,5836 g.

d Bereken het massapercentage fluoride in de onderzochte tandpasta. Neem aan dat al het fluoride is neergeslagen als PbClF .

Naar: CE vwo 2013-I

4 Bruistablet

Een bruistablet bevat 500 mg acetylsalicylzuur (aspirine) en daarnaast citroenzuur ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) en natriumwaterstofcarbonaat (figuur 9.45).

a Verklaar met behulp van een reactievergelijking het bruisen van een bruistablet tijdens het oplossen. Gebruik citroenzuur in je reactievergelijking.

b Welk voordeel heeft een bruistablet boven een tablet die niet bruist?

Na het oplossen van het bruistablet in 50 mL water blijkt de pH 5,60 te zijn. Citroenzuur is een driewaardig zuur met K_z -waarden van respectievelijk $7,1 \cdot 10^{-4}$, $1,7 \cdot 10^{-5}$ en $4,1 \cdot 10^{-7}$.

c Leg uit welke van de basen $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^{-}$, $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ of $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ de hoogste concentratie heeft. Tip: bereken de verhouding van elk zuur met zijn geconjugeerde base met de K_z en de $[\text{H}_3\text{O}^{+}]$.

Acetylsalicylzuur is een éénwaardig zuur met een $\text{p}K_z$ van 3,48.

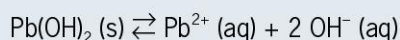
d Bereken de concentratie van acetylsalicylzuur en die van de bijbehorende base na het oplossen van het bruistablet. De molecuulformule van acetylsalicylzuur is $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4$.



9.45 Bruistablet

5 Afval

Bepaalde chemische verontreinigingen moeten uit het afvalwater van een fabriek worden verwijderd voordat je het water mag lozen. Metaalionen zoals Pb^{2+} kun je verwijderen door natronloog aan het afvalwater toe te voegen. Het volgende evenwicht stelt zich dan in:



De evenwichtsconstante is gelijk aan $1,4 \cdot 10^{-20}$.

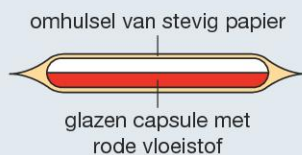
a Geef de evenwichtsvoorwaarde.

Wanneer door toevoegen van natronloog de pH is opgelopen tot 9,60, is de $[\text{Pb}^{2+}]$ in de vloeistof zeer klein geworden.

b Bereken de $[\text{Pb}^{2+}]$ in het afvalwater bij deze pH.



6

Ammoniacapsule

9.46 De ammoniacapsule

AMMONIA INHALANT

0,33 mL
alcohol 35%
ammonia 15%

9.47 Informatie op het papieren omhulsel van de ammoniacapsule

Als iemand dreigt flauw te vallen, kun je gebruikmaken van een zogenoemde 'ammonia-inhalant' (figuur 9.46). Deze bestaat uit een glazen buisje (capsule) in een omhulsel van stevig papier.

Als de capsule breekt, wordt het papier rood en komt er een hoeveelheid ammoniakdamp vrij. Als deze damp in je neus komt, ben je meteen weer bij je positieven. Op het papieren omhulsel (figuur 9.47) staat de informatie over de inhoud.

Als het papieren omhulsel wordt verwijderd, komt de glazen capsule te voorschijn. De vloeistof in deze capsule blijkt rood te zijn. Sergio wil wat meer te weten komen over de inhoud van de capsule. Daarom doet hij een aantal experimenten.

Sergio vermoedt dat de rode kleur van het mengsel in de capsule een gevolg is van de aanwezigheid van een indicator. Om na te gaan welke indicator dat zou kunnen zijn, raadpleegt hij Binas tabel 52A.

- a Leg uit welke in Binas tabel 52A genoemde indicatoren allemaal verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor de rode kleur van het mengsel in de capsule. Neem daarbij aan dat de aanwezige alcohol geen invloed heeft op de kleur van de indicator.
- b Beschrijf op welke manier Sergio kan onderzoeken of de rode kleur van het mengsel in de capsule inderdaad een gevolg is van de aanwezigheid van een indicator. Beschrijf daarbij zijn werkwijze en de waarneming(en) waaruit hij de conclusie kan trekken.

Ten slotte bepaalt Sergio de molariteit van de ammoniak in de capsule. Daartoe breekt hij een capsule in een bekersglas met water. Hieraan voegt hij met een injectiespuit druppelsgevijs 0,40 M zoutzuur toe.

Na toevoegen van 8,6 mL hebben alle ammoniakmoleculen gereageerd.

- c Geef de vergelijking van de reactie die optreedt tijdens het toevoegen van zoutzuur.
- d Bereken met behulp van de resultaten van dit laatste experiment de molariteit van de ammoniak in de capsule in mol L^{-1} .
- e Bereken de pH van de oplossing in de capsule.

Naar: CE havo 2006 II

Keuzeopdrachten

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

1

Zuur-basebalans in je lichaam

Je onderzoekt de invloed van zuren en basen op je gezondheid en je ontdekt waarom een goede zuur-basebalans in je lichaam zo belangrijk is.

2

E-nummers

Welke zuren en basen worden in voedsel gebruikt? Je verdiept je in de wereld van E-nummers en in andere stoffen die fabrikanten aan voedsel toevoegen.

3

pH en medicijnen

De pH is erg belangrijk bij de keuze van de manier waarop je medicijnen verpakt. De werking van een medicijn kan erg afhangen van de pH.

Overzicht begrippen

Base, zwakke base

Een base is de tegenhanger van een zuur: een zuur kan een H^+ -ion afstaan, een base kan juist een H^+ -ion opnemen. Bij een zwakke base treedt een evenwichtsreactie met water op.

Baseconstante

De baseconstante is de evenwichtsconstante bij een oplossing van een zwakke base in water. De baseconstante geef je weer met K_b en komt voor een zwakke base Z^- overeen met onderstaande formule:

$$K_b = \frac{[OH^-][HZ]}{[Z^-]}$$

Deze formule gebruik je voor berekeningen aan zwakke basen.

Geconjugeerd zuur-basepaar

Een **geconjugeerd zuur** heeft één H^+ meer dan de **geconjugeerde base**. Het paar staat op één regel in Binas tabel 49.

Kalkwater

Kalkwater ($Ca^{2+}(aq) + OH^-(aq)$) is een reagens op koolstofdioxide. De troebeling ontstaat door de zuur-basereactie waarbij vast calciumcarbonaat ontstaat.

Meerwaardige base

Een meerwaardige base kan meer dan één H^+ -ion opnemen.

pOH

Met de pOH geef je aan hoe basisch een oplossing is.

$$pOH = -\log[OH^-]$$

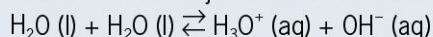
Onder standaardomstandigheden geldt: $pH + pOH = 14,00$

Systematische en toevallige fouten

Bij kwantitatieve analyse kunnen toevallige en systematische fouten ontstaan die het gevolg zijn van onjuist aflezen van de meetwaarden of van onnauwkeurigheid van de gebruikte apparatuur.

Waterevenwicht

In water heerst altijd het waterevenwicht:



De evenwichtsconstante van dit evenwicht is de **waterconstante**, K_w .

Zuur-basereactie

In een zuur-basereactie geeft een zuur (donor) één of meer H^+ -ionen af aan een base (acceptor). Voor het opstellen van een zuur-basereactie kun je gebruikmaken van een stappenplan.

Zuur-basetitratie

Als je de molariteit van een zure of basische oplossing wilt bepalen, kun je gebruikmaken van een zuur-basetitratie. Het zuur of de base die je onderzoekt laat je reageren met een bekende hoeveelheid base of zuur. Het **equivalentiepunt** is het eindpunt van de titratie, waarbij geen beginstoffen meer aanwezig zijn.

Het equivalentiepunt ligt in het **omslagtraject** van de gebruikte indicator.

10 Analyse

Inhoud

- ⊕ **10.1** Spectroscopie
Experiment:
10.1 Zouten kleuren de vlam
- ⊕ **10.2** Kwalitatieve analyse
- 10.3** Kwantitatieve analyse
Experimenten:
10.2 Kleurenblind en toch kleuren herkennen
10.3 Fosfaatgehalte in water
10.4 Thiocynaat in speeksel
- 10.4** Chromatografie
Experimenten:
10.5 Chromatografie van aminozuren
10.6 Schuldig of onschuldig?
10.7 Analyse met de Nano-GC
- 10.5** Massaspectrometrie
- Afsluiting
- Overzicht begrippen



Nederlands Forensisch Instituut

In dit instituut wordt onderzoek gedaan om misdaden te kunnen oplossen, zoals DNA-onderzoek waar hier monsters voor worden gepipetteerd. Voor sporenonderzoek zijn geavanceerde analysetechnieken nodig zoals vloeistof- en gaschromatografie.

10

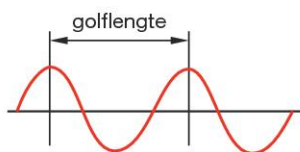
Het ontstaan van sterren

Op 7000 lichtjaar van de aarde bevindt zich de Adelaarsnevel. Dit is een van de vele plekken in het heelal waar nieuwe sterren ontstaan. Uit het licht en andere straling die hierbij vrijkomen, kun je de chemische samenstelling bepalen van sterren en eventuele bijbehorende planeten. De meetmethode die je dan gebruikt, heet spectroscopie.

**Je leert**

- de kenmerken van elektromagnetische straling;
- wat absorptie- en emissiespectra zijn;
- hoe met behulp van spectroscopie metingen aan stoffen worden gedaan.

+ 10.1 Spectroscopie



10.1 De golflengte is de lengte van een golf, bijvoorbeeld de afstand tussen twee gelijke punten, zoals tussen de toppen van een golf.

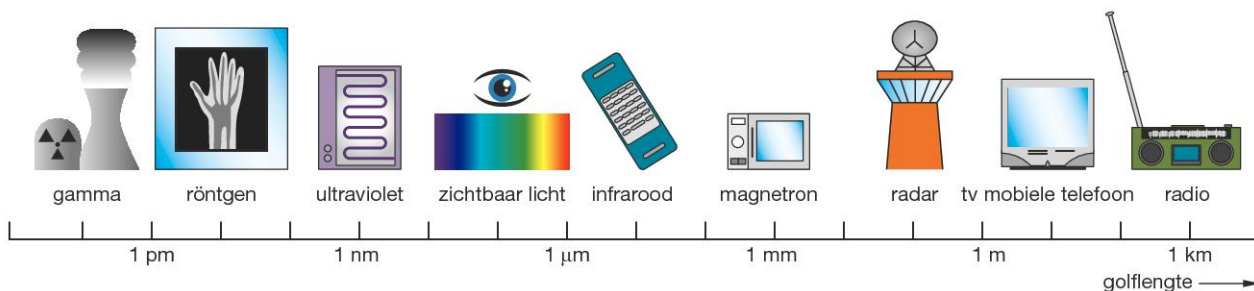
Elektromagnetische straling

Voor de onderzoeksmethoden die je tot nu toe hebt toegepast, zoals titraties en het aantonen van stoffen met reagentia, maak je gebruik van een chemische reactie. Als je iets wilt onderzoeken wat je niet wilt laten reageren of wat niet bij je in de buurt is, bijvoorbeeld de Adelaarsnevel in het heelal, dan kun je gebruikmaken van licht.

Alles om je heen kun je zien doordat het licht reflecteert. Licht is een vorm van elektromagnetische straling. Andere vormen van elektromagnetische straling zijn radiogolven, infrarode straling, ultraviolette straling en röntgenstraling, zie figuur 10.2.

Alle elektromagnetische straling beweegt met de lichtsnelheid, $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Die beweging van elektromagnetische straling is een golf en de afstand tussen twee golftoppen noem je de **golflengte**, zie figuur 10.1. Golflengte wordt vaak weergegeven in nanometer; één nanometer is één miljardste meter ($1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$).

De verschillende soorten elektromagnetische straling verschillen van elkaar in golflengte. In Binas tabel 19B staat een overzicht van de verschillende soorten elektromagnetische straling gerangschikt op golflengte.



10.2 Het elektromagnetisch spectrum

Elektromagnetische straling bevat energie. Daarvan maak je gebruik als je voedsel met een magnetron verwarmt. Voedsel bevat vaak relatief veel water en de elektromagnetische straling in een magnetron laat watermoleculen sneller bewegen, waardoor het water warmer wordt. Doordat het water warm wordt, wordt het eten ook warm.

Je kunt je elektromagnetische straling voorstellen als een golf, maar ook als een bundel energiepakketjes, **fotonen** genaamd. De energie-inhoud van een foton is omgekeerd evenredig met de golflengte. Dat betekent dat fotonen met een grote golflengte een lagere energie hebben dan fotonen met een kleine golflengte. Zichtbaar licht is niet gevaarlijk voor mensen, maar bijvoorbeeld röntgenstraling wel. Dat komt doordat de fotonen een veel kleinere golflengte hebben en daardoor een hogere energie. De natuurkundige Max Planck ontdekte in 1900 het verband tussen de energie van elektromagnetische straling en de golflengte van deze straling. Hij kreeg er een Nobelprijs voor.

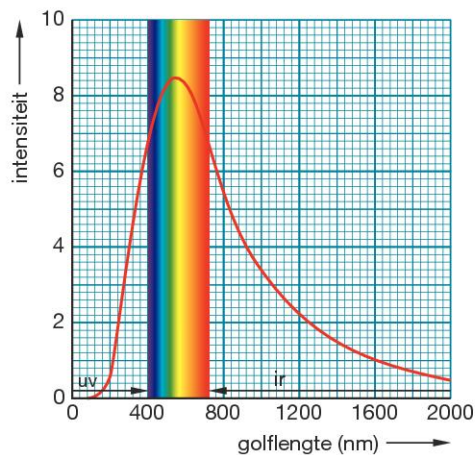


10.3 Een regenboog: zonlicht wordt gebroken door waterdruppels waardoor de verschillende golflengtes zichtbaar worden.

Spectra

Als de zon na een regenbui schijnt, kan er een regenboog ontstaan. Het witte licht van de zon bestaat uit verschillende kleuren licht. Elke kleur heeft zijn eigen golflengte. Wanneer het zonlicht door de regendruppeltjes in de lucht valt, wordt het licht gebroken, zie figuur 10.3. De verschillende golflengtes worden uit elkaar gebogen en je ziet de afzonderlijke kleuren. Ook met een glazen prisma kun je licht breken.

Een regenboog toont het **spectrum** van het zonlicht, zie figuur 10.4. Een spectrum is een weergave van alle golflengtes die een bepaalde straling bevat. De analysemethode **spectroscopie** bestudeert met behulp van spectra het effect van elektromagnetische straling op stoffen. Stoffen kunnen deze straling reflecteren, absorberen of uitzenden.



10.4 Het spectrum van zonlicht

Absorberen van elektromagnetische straling

Absorptie van elektromagnetische straling gebeurt bijvoorbeeld bij water in een magnetron. Met absorptie van straling kun je ook verklaren waarom dingen een kleur hebben: waarom bijvoorbeeld gras groen is. Als zonlicht op gras valt, dan wordt alleen het groene licht teruggekaatst. De andere kleuren licht worden geabsorbeerd door de stoffen in het gras. De kleur en dus de golflengte van de straling die wordt teruggekaatst, is afhankelijk van de soort stof.

● Experiment 10.1



10.5 Een neonlamp zendt rood licht uit.

Uitzenden van elektromagnetische straling

Bij rode lichtreclames worden neonlampen gebruikt. Deze lampen zijn gevuld met het gas neon. Als er een elektrische spanning op de lamp wordt gezet, zendt het gas een rood licht uit, zie figuur 10.5. Als je keukenzout in een vlam verhit, dan zie je een geeloranje kleur. Dit licht wordt uitgezonden door de natriumionen uit het zout. Atomen, moleculen en ionen kunnen dus elektromagnetische straling uitzenden.

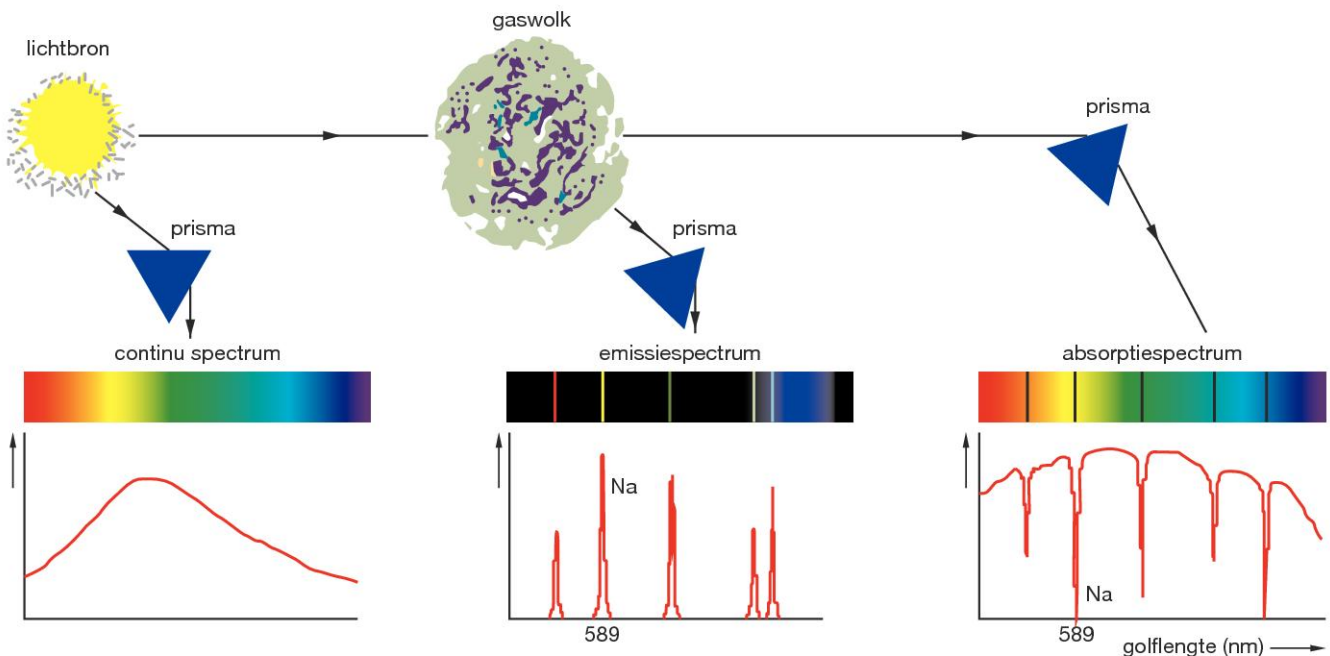
In een spectrum kun je zien bij welke golflengte(s) een stof absorbeert of uitzendt.

Door een bepaald soort elektromagnetische straling op een stof te laten vallen en een spectrum te maken van de straling die erdoorheen gaat, krijg je een **absorptiespectrum**. Hierin zie je bij welke golflengtes de stof elektromagnetische straling absorbeert. Als er bijvoorbeeld wit licht op een stof valt, dan kun je in het absorptiespectrum zien welke kleuren er worden geabsorbeerd.

Van de elektromagnetische straling die een stof uitzendt kun je ook een spectrum maken. Je noemt zo'n spectrum een **emissiespectrum**. In een emissiespectrum zie je bij welke golflengte een stof elektromagnetische straling uitzendt.

Door licht en andere elektromagnetische straling op te vangen kun je dus iets zeggen over de samenstelling van de bron van de straling en over de stoffen waar de straling doorheen is gegaan, zie figuur 10.6.

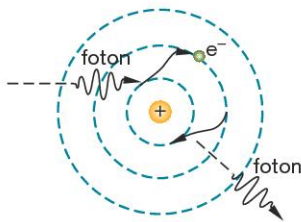
In Binas tabel 20 vind je emissie- en absorptiespectra van een aantal stoffen.



10.6 De verschillende spectra

Energieniveaus

In het absorptiespectrum van natrium zie je dat natriumatomen absorberen bij 589 nm. In het emissiespectrum van natrium zie je een piek bij 589 nm. Alle atomen absorberen bij dezelfde golflengte(s) als die ze uitzenden. Om dit te begrijpen moeten we kijken naar het atoommodel van Bohr. Hierin zijn de elektronen in schillen rond de kern verdeeld. Elke schil heeft zijn eigen energieniveau. Alle elektronen in die schil hebben dezelfde energie. Een elektron kan, als het een foton opneemt, naar een schil met een hoger energieniveau. Het elektron gaat dan over van de **grondtoestand** naar de **aangeslagen toestand**.



10.7 Het absorberen en uitzenden van een foton

Als je fotonen met verschillende energieën (verschillende golflengtes) op een atoom laat vallen, dan absorberen de elektronen in het atoom alleen die fotonen die ze van de grondtoestand naar de aangeslagen toestand kunnen brengen. Na een tijdje valt een elektron vanuit de aangeslagen toestand weer terug naar de grondtoestand. Er komt dan energie vrij. Die energie zendt het atoom uit in de vorm van een foton. Zie figuur 10.7.

Bij natrium komt het energieverval tussen de grondtoestand en de aangeslagen toestand overeen met de energie van een foton met een golflengte van 589 nm.

De hoogte van de energieniveaus verschilt per atoomsoort, waardoor elke atoomsoort een uniek absorptie- en emissiespectrum heeft.

Schotrestenanalyse

Als een vuurwapen wordt gebruikt, dan komen er schotresten vrij. Deze kunnen terechtkomen op de schutter, het slachtoffer en personen in de buurt. De schotresten bestaan uit roet (koolstof), metaaldeeltjes, onverbrand kruit en andere zouten die afkomstig zijn van de kogel en de slagpin van het wapen.

Als de politie schotresten aantreft op de handen of kleding van een verdachte, dan weet ze dat hij een wapen heeft afgevuurd of in ieder geval daarbij aanwezig was. Ze weet dan nog niet meteen of hij de dader is. Daarvoor kunnen de schotresten van de verdachte worden vergeleken met aanwezige schotresten op de plek van de misdaad. De precieze samenstelling van schotresten is afhankelijk van het soort vuurwapen en het soort kogel. Met behulp van atomaire absorptiespectroscopie (AAS) is die exacte samenstelling te achterhalen.

Bij AAS wordt licht met precieze golflengtes door een vlam gestraald. Het ingestraalde licht wordt geabsorbeerd door de atomen in de vlam. Het licht dat door de vlam heengaat, en dus niet is geabsorbeerd, wordt gemeten.

De mate van absorptie wordt bepaald door de concentratie van de atomen in de vlam. De schotresten worden in de vlam gebracht en de verschillende metaalatomen absorberen straling, afhankelijk van hun soort en hoeveelheid. Bij schotrestenanalyse wordt van een aantal relevante metaalatoomsorten zoals lood, zink, nikkel en antimoon de hoeveelheid bepaald. De verhouding hiertussen levert een unieke samenstelling op. Deze kunnen rechercheurs gebruiken om te bepalen of de verdachte is aan te merken als dader.



10.8 Er komt veel fijnstof vrij bij het afvuren van een kogel.

● Opdracht C7

Samenvatting

- Licht is een vorm van elektromagnetische straling. Alle elektromagnetische straling beweegt met de lichtsnelheid en heeft een golflengte, die bepaalt wat voor soort straling ze is. Elektromagnetische straling bestaat uit fotonen. Fotonen zijn energiepakketjes. De golflengte van de straling is omgekeerd evenredig met de energie van de fotonen.
- Een weergave van alle golflengtes in één soort elektromagnetische straling is een spectrum. Een absorptiespectrum geeft de straling aan die een stof absorbeert, een emissiespectrum geeft de straling aan die een stof uitzendt.
- Als elektromagnetische straling met de juiste energie (golflengte) op atomen valt, dan kunnen elektronen in die atomen fotonen opnemen. Het elektron gaat van de grondtoestand naar de aangeslagen toestand. Bij het terugvallen naar de grondtoestand geeft het elektron dit foton weer af.

Opdrachten

A 1

- a** Noem drie soorten elektromagnetische straling.
b Hoe verschillen die soorten elektromagnetische straling van elkaar?

A 2

Waardoor bevindt zich de piek in het absorptiespectrum van natrium op dezelfde plek als de piek in het emissiespectrum van natrium?

B 3 

De zon zendt veel soorten straling uit, onder meer bij 1050 nm. De energie van een foton kun je berekenen met de formule van Planck:

$$E = h \times \frac{c}{\lambda}$$

Hierin is:

- E de fotonenergie in J
 h de constante van Planck: $6,626 \cdot 10^{-34}$ J s
 c de lichtsnelheid: $2,998 \cdot 10^8$ m s⁻¹ (in vacuüm)
 λ de golflengte in m

- a** Bereken de energie van de fotonen met een golflengte van 1050 nm.
b Zoek in Binas tabel 19B op welk soort elektromagnetische straling dit is.

B 4 ★

Glasvezels worden in het internetverkeer gebruikt voor een snelle overdracht van data. In een bepaald type glasvezel is de golflengte van de uitgezonden straling $1,3 \cdot 10^3$ nm.

- a** Bereken de energie van de fotonen van deze straling. Gebruik de formule uit de vorige opgave. Ga ervan uit dat de snelheid van het licht in de glasvezel 97% is van de snelheid van het licht in vacuüm.

De glasvezel heeft een lengte van 12 km.

- b** Hoelang duurt het voor een signaal deze afstand heeft afgelegd?

B 5 

Bekijk het spectrum van wit licht in Binas tabel 20.

- a** Tussen welke golflengtes reflecteert een wortel vooral?
b Leg uit welke kleur een wortel heeft als je er met een groene lamp op schijnt.

C 6 **Fraunhoferlijnen** ★

Helium is ontdekt door analyse van het absorptiespectrum van zonlicht. Dat spectrum bevat zwarte lijnen, de zogenoemde fraunhoferlijnen, zie spectrum 2 in Binas tabel 20. Een van de fraunhoferlijnen hoort bij helium.

- a** Leg met behulp van energieniveaus uit hoe de fraunhoferlijn van helium ontstaat.

De fraunhoferlijn van helium hoort bij een verschil tussen energieniveaus van 2,115 eV. 1 eV is gelijk aan een energie van $1,60 \cdot 10^{-19}$ J.

- b** Bereken bij welke golflengte (in nm) de fraunhoferlijn van helium in het spectrum van zonlicht is te zien. Gebruik de formule uit opgave B3.

C 7

Lees de tekst in het kader 'Schotrestenanalyse' en beantwoord de volgende vragen.

Bij AAS wordt atomaire absorptie onderzocht.

- a** Wat moet je veranderen aan de analyse om de atomaire emissie te onderzoeken?
b Leg uit of je met atomaire emissiespectroscopie dezelfde resultaten als met AAS zult vinden.
c Hoe bepaal je de golflengte van het licht waarmee je met AAS bijvoorbeeld lood meet?

Experiment

10.1 Zouten kleuren de vlam

Onderzoek naar de kleuren van ionen in de vlam.

- Volledige instructie *Chemie Overal* online

Je kunt nu

- uitleggen wat spectroscopie is en opzoeken welke kleur licht bij welke golflengte hoort;
- uitleggen wat het verschil is tussen een absorptie- en een emissiespectrum;
- de oorzaak van absorptie en emissie van elektromagnetische straling door atomen verklaren.

Ratelslangen

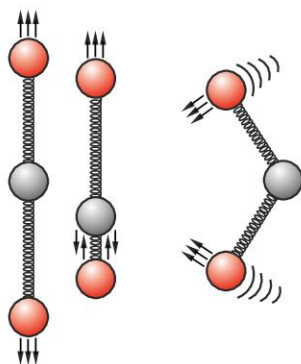
Om hun prooi te zien, gebruiken ratelslangen behalve hun ogen ook een speciaal extra zintuig. Dit zintuig bevindt zich in groefjes aan weerszijden van hun kop tussen de ogen en de neus. Hiermee kunnen ze warmtestraling 'zien'. Daardoor kan een ratelslang 's nachts een muis op een meter afstand waarnemen.



Je leert

- wat ir-spectroscopie is;
- wat uv/VIS-spectroscopie is.

+ 10.2 Kwalitatieve analyse



10.9 Vibratiemogelijkheden van een CO_2 -molecuul: links strekvibraties en rechts buigvibratie

Infraroodspectroscopie

Methodes waarbij je informatie krijgt over de bouw van stoffen of de samenstelling van een mengsel vallen onder **kwalitatieve analyse**. Een voorbeeld van kwalitatieve analyse is ir-spectroscopie. Deze vorm van spectroscopie kijkt naar de absorptie van straling door moleculen in het infraroodgebied. Infrarode straling, vaak ir-straling genoemd, is 'zichtbaar' voor sommige dieren zoals de ratelslang, maar onzichtbaar voor de mens. Je kunt infrarood wel waarnemen als warmte.

Ir-straling heeft een grotere golflengte dan licht en dus een lagere energie. Door ir-straling gaan de elektronen in atomen niet naar een aangeslagen toestand. Ze zorgt wel voor warmte doordat de atoombindingen in moleculen sterker gaan vibreren. De atoombindingen kun je daarbij zien als veertjes.

Er zijn twee soorten vibraties mogelijk: **strekvibratie** en **buigvibratie**. Bij strekvibratie bewegen de atomen van elkaar af en naar elkaar toe, hierdoor verandert de bindingslengte. Bij buigvibratie verandert de hoek tussen de bindingen in een molecuul, zie figuur 10.9. Als ir-straling van de juiste golflengte op een molecuul valt worden bepaalde vibraties in het molecuul versterkt en wordt de vibratie van het hele molecuul sterker. Door deze sterkere bewegingen van het molecuul wordt de temperatuur van de stof hoger.

Elk soort atoombinding absorbeert ir-straling bij een andere golflengte. Wanneer je ir-straling van verschillende golflengtes op een stof laat vallen en je meet welke golflengtes de stof absorbeert, krijg je informatie over de bindingen in de moleculen van die stof. Het maken van een absorptiespectrum met ir-straling heet **ir-spectroscopie**.



10.10 Met een warmtecamera kun je zien welke delen van je huis je moet isoleren.

Analyse van een ir-spectrum

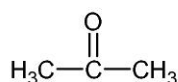
In Binas tabel 39C1 en C2 zie je een groot aantal bindingen in moleculen met het bijbehorende absorptiegebied van de ir-straling. Hiermee kun je van elke piek in een ir-spectrum herleiden bij welk type binding deze hoort. Daardoor krijg je informatie over de structuur van de moleculen van een stof, zie voorbeeld 1 en 2.

Zoals je in Binas tabel 39C2 ziet, staat bij het absorptiegebied van de bindingen de eenheid cm^{-1} . Bij ir-spectra is het om praktische redenen gebruikelijk om op de horizontale as niet de golflengte te gebruiken maar het golfgetal. Het golfgetal is de omgekeerde waarde van de golflengte, $1/\lambda$ met de eenheid cm^{-1} . Straling met een golfgetal van 2500 cm^{-1} komt overeen met straling met een golflengte van 4000 nm .

Het golfgetal staat langs de x-as van hoog naar laag. Op de verticale as in een ir-spectrum staat vaak de transmissie in plaats van de absorptie. De transmissie is het percentage van de opvallende straling dat wordt doorgelaten.

Voorbeeld 1: Ir-spectrum van aceton

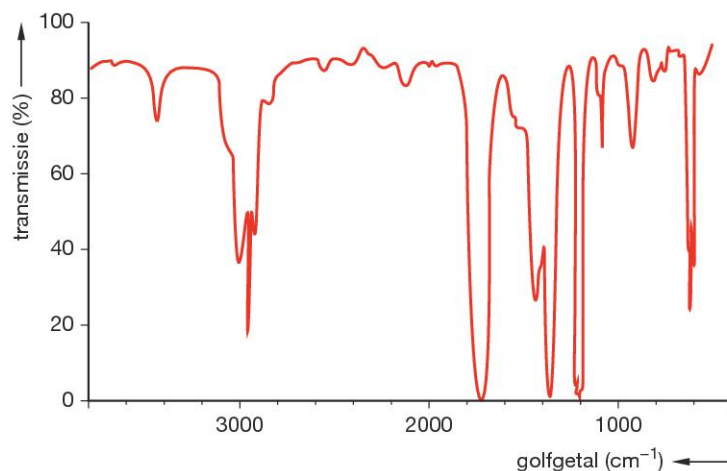
In figuur 10.12 zie je het ir-spectrum van aceton (propanon):



Je ziet hierin een absorptiepiek tussen 1700 en 1800 cm^{-1} . In Binas tabel 39C2 kun je zien dat deze overeenkomt met de ketonbinding ($\text{C}=\text{O}$) van aceton. Sommige bindingen zoals $\text{C}-\text{H}$ vertonen bij meer golfgetallen absorptie, omdat de buigvibratie bij een ander golfgetal absorbeert dan de strekvibratie.



10.11 Sommige nagellakremovers bevatten aceton.

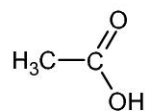


10.12 Infraroodspectrum van aceton

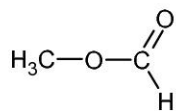
Voorbeeld 2

Het ir-spectrum in figuur 10.13 is van een stof met molecuulformule $C_2H_4O_2$. Uit andere analyses bleek verder dat de stof een niet-cyclische en verzadigde verbinding is. Mogelijke stoffen met deze molecuulformule zijn azijnzuur (ethaanzuur) en methylmethanoaat. Van welke stof is het gegeven spectrum in figuur 10.13?

De structuurformules van de mogelijke stoffen zijn:

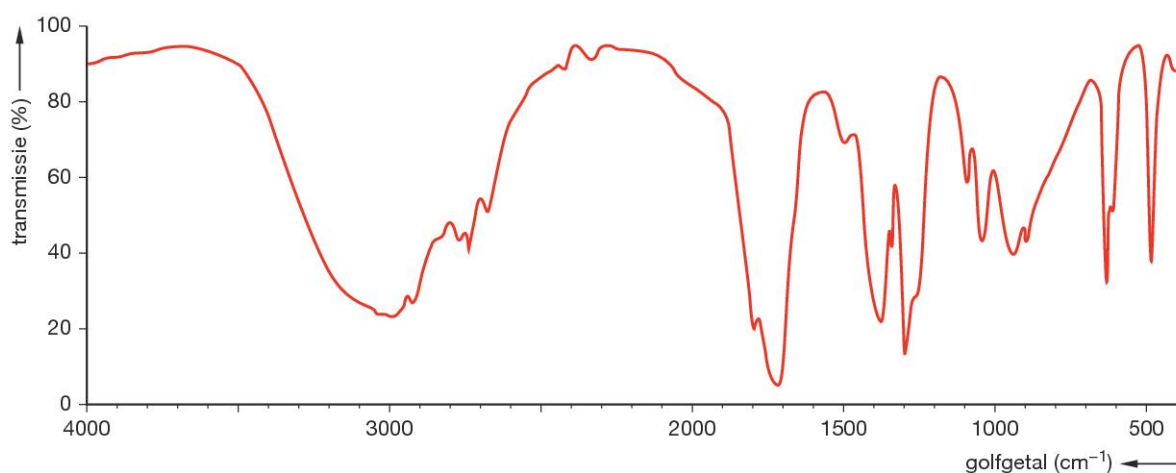


azijnzuur

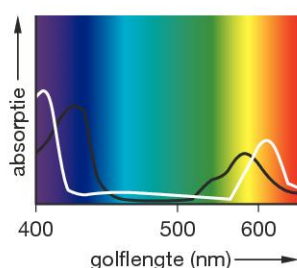


methylmethanoaat

In het ir-spectrum zie je een brede piek tussen 3500 en 2500 cm^{-1} , deze hoort bij een O–H-binding en H-bruggen. Moleculen methylmethanoaat bevatten geen O–H-bindingen en azijnzuurmoleculen wel. Dit ir-spectrum hoort dus bij azijnzuur en niet bij methylmethanoaat.



10.13 Infraroodspectrum van $C_2H_4O_2$



10.14 Het absorptiespectrum van chlorofyl a (witte lijn) en chlorofyl b (zwarte lijn) van zichtbaar licht

uv/VIS-spectroscopie

Bij **uv/VIS-spectroscopie** meet je de absorptie van ultraviolette straling (uv) en licht (zichtbare elektromagnetische straling, VIS = visible). Hierbij heb je te maken met de overgang van een elektron van de grondtoestand naar de aangeslagen toestand door opname van een foton.

In de vorige paragraaf heb je geleerd dat gras een deel van het licht absorbeert en alleen groen licht terugkaatst. De stof in gras en in andere groene planten die hiervoor verantwoordelijk is, is chlorofyl. In figuur 10.14 zie je het absorptiespectrum van chlorofyl, gemaakt met een spectrofotometer voor zichtbare elektromagnetische straling. In zo'n absorptiespectrum zie je niet alleen bij welke golflengtes een stof absorbeert, maar ook hoeveel er wordt geabsorbeerd.

Bij uv/VIS-spectrofotometrie, ook wel **colorimetrie** genoemd, meet je de absorptie van uv/VIS-straling van een oplossing bij een specifieke golflengte. Daaruit kun je de concentratie van de oplossing berekenen. Het is dus een **kwantitatieve analyse**. Dit wordt uitgelegd in de volgende paragraaf.

Vanillesmaak

Vanille is een smaakstof die afkomstig is uit de vruchten van de klimorchidee. Vanille wordt gebruikt in levensmiddelen, maar ook in onder andere tabak en parfum. De vanille-orchidee komt oorspronkelijk uit Mexico, maar Madagaskar is momenteel een van de grootste producenten van vanille, zie figuur 10.15. De grootste verbruiker van natuurlijke vanille is The Coca-Cola Company. Toen in 1985 'New Coke' werd geïntroduceerd, stortte de economie van Madagaskar in. De reden was dat in 'New Coke' geen echte vanille meer werd gebruikt, maar een kunstmatig gemaakte smaakstof. Het gebruik van echte vanille liep tijdens deze periode met meer dan de helft terug. Pas nadat de nieuwe cola uit het assortiment werd gehaald, krabbelde de economie van Madagaskar weer omhoog.



10.15a Vanillepeulen

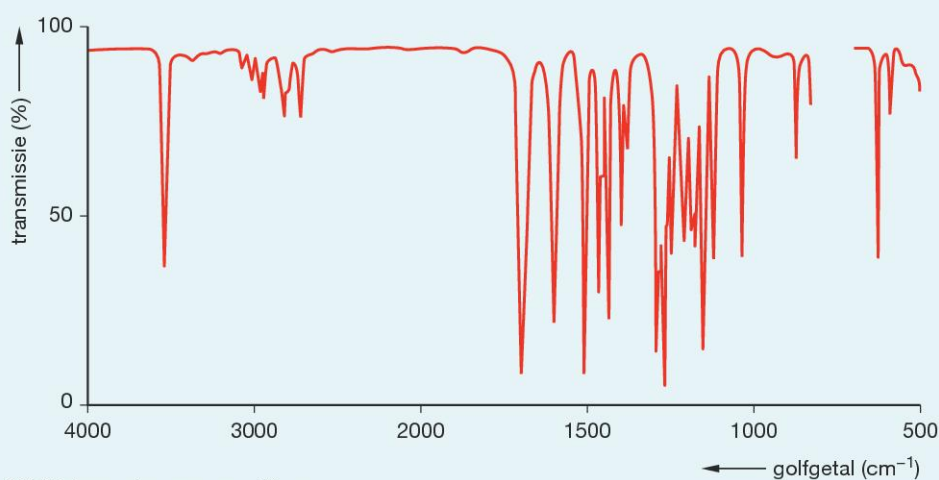


10.15b Gedroogde vanillestokjes en de vanilleorchidee

The Coca-Cola Company had voor 'New Coke' de echte vanille tijdelijk vervangen door vanilline, de belangrijkste aromastof van vanille.

In figuur 10.16 zie je het ir-spectrum van vanilline (4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde). De piek net boven de 3500 cm^{-1} wordt veroorzaakt door de alcoholgroep ('hydroxy'). De piek bij 1150 cm^{-1} komt van de ethergroep ('methoxy').

Vanilline wordt in fabrieken onder andere gemaakt uit kruidnagelolie. De geurstof van kruidnagelen bestaat hoofdzakelijk uit de olieachtige vloeistof eugenol. Om na te gaan of de vorming van vanilline uit eugenol is gelukt, wordt er gebruikgemaakt van ir-spectroscopie.



10.16 Ir-spectrum van vanilline

● Opdracht C14

Samenvatting

- Methodes waarbij je informatie krijgt over de bouw van stoffen of de samenstelling van een mengsel vallen onder kwalitatieve analyse.
- Ir-spectroscopie kijkt naar de absorptie van infraroodstraling (ir) door moleculen en maakt daarbij gebruik van de strek- en buigvibraties in een molecuul.
- Met een ir-spectrum bepaal je de structuur van moleculen. Je analyseert welke soort atoombindingen er in de moleculen van een stof zijn.
- Met licht en uv-straling kun je concentraties bepalen. Dit heet uv/VIS-spectrofotometrie.

Opdrachten

A 8

- Wat gebeurt er in moleculen als stoffen ir-straling absorberen?
- Wat is het verschil tussen ir-spectrometrie en uv/VIS-spectroscopie?

B 9

Voor ir-analyse wordt een monster van de te onderzoeken stof goed gedroogd zodat het geen water bevat. Als het monster water bevat, dan zie je dit namelijk in het ir-spectrum als een piek die ook in het spectrum van alcoholen zit.

- Wat zie je dan in het spectrum?
- Waarom zou dat vervelend kunnen zijn?

Bij ir-spectrometrie wordt het monster vaak met kaliumbromide gemengd. Kaliumbromide geeft geen signaal in een ir-spectrometer.

- Leg uit waarom je kaliumbromide niet kunt meten met ir-spectrometrie.
- Leg uit welke van de volgende zouten je wel zou kunnen meten met ir-spectrometrie: CaF_2 , KNO_3 , NH_4Cl , Al_2O_3 .

B 10

In de tekst van deze paragraaf staat dat een golfgetal van 2500 cm^{-1} overeenkomt met een golflengte van 4000 nm .

- Laat zien dat 2500 cm^{-1} overeenkomt met 4000 nm .
- Bereken het golfgetal in cm^{-1} dat overeenkomt met een golflengte van $12\,500\text{ nm}$.
- Bereken de energie van fotonen met een golflengte van $12\,500\text{ nm}$ (zie opgave B3).
- Maak onderstaande zin kloppend door op elk van de open plekken *groter* of *kleiner* in te vullen. Hoe groter het golfgetal, hoe ... de golflengte en hoe ... de energie.

B 11 IPA

IPA is een veelgebruikte stof. IPA is een ontsmettingsmiddel in ziekenhuizen en een sterk oplosmiddel. De stof wordt ook gebruikt om te ontvetten zoals in brillendoekjes.



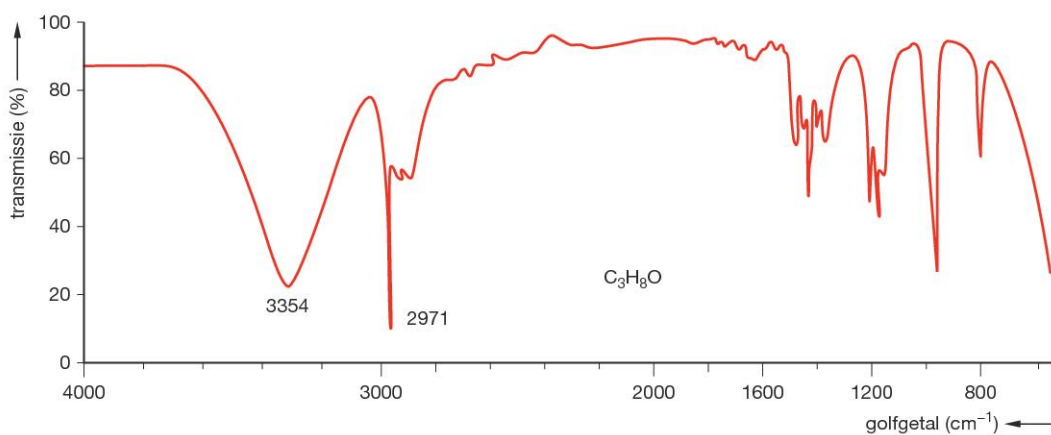
10.17 IPA is het ontvettingsmiddel in brillendoekjes.

De molecuulformule van IPA is $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$. Met behulp van een infraroodspectrum is het soms mogelijk om de molecuulstructuur van een stof op te helderen, uitgaande van de molecuulformule.

- Leg op basis van de molecuulformule uit of er in een IPA-molecuul een dubbele binding kan voorkomen.
- Geef de structuurformule van alle isomeren met molecuulformule $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$.

Bestudeer het ir-spectrum van IPA in figuur 10.18.

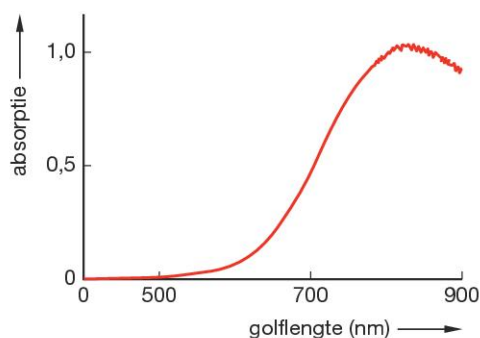
- Leg uit voor welke karakteristieke groepen je in dit ir-spectrum een aanwijzing ziet.
- Leg uit of je op basis van de gegevens kunt bepalen welk isomeer IPA is.



10.18 Infraroodspectrum van IPA

B 12

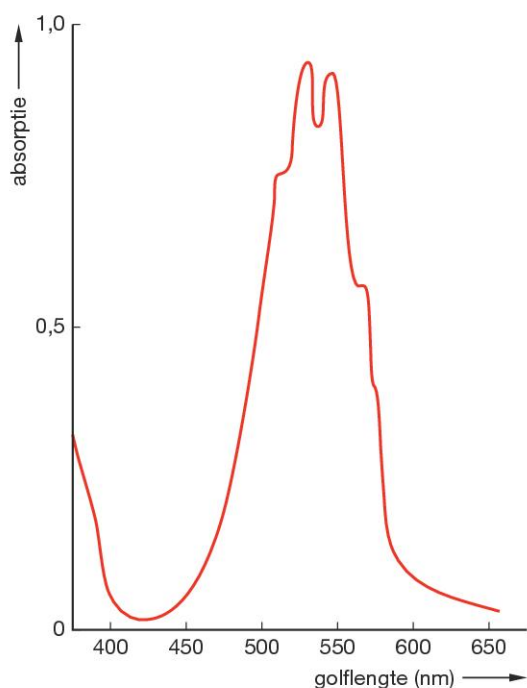
In figuur 10.19 zie je het absorptiespectrum van een oplossing met koperionen. Bepaal aan de hand van dit spectrum de kleur van een oplossing met koperionen.



10.19 VIS-absorptiespectrum van koperionen

B 13

In figuur 10.20 zie je het uv/VIS-absorptiespectrum van een oplossing met permanganaationen (MnO_4^-).



10.20 VIS-absorptiespectrum van permanganaationen

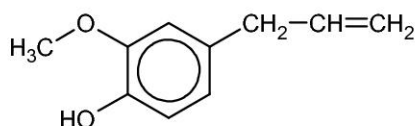
- Bepaal aan de hand van dit spectrum de kleur van gehydrateerde permanganaationen.
- Leg uit bij welke golflengte je zou meten als je de permanganaat concentratie spectrofotometrisch zou willen bepalen.

C 14

Lees de tekst in het kader 'Vanillesmaak' en beantwoord de volgende vragen.

- Geef de structuurformule van vanilline.

Hieronder zie je de structuurformule van eugenol.



Om eugenol uit kruidnagelolie te krijgen, schudt men de kruidnagelolie met natronloog. In de reactie die daarbij optreedt, reageert eugenol als zuur. Dit is mogelijk doordat de alcoholgroep die in een eugenolmolecuul aan de benzeenring is gebonden zure eigenschappen heeft.

- Geef de reactievergelijking van de reactie van eugenol met natronloog. Gebruik structuurformules voor de organische deeltjes.

Om na te gaan of uiteindelijk eugenol inderdaad tot vanilline is omgezet, wordt van het reactieproduct een infraroodspectrum opgenomen. Dit spectrum wordt vergeleken met het ir-spectrum van de beginstof eugenol.

In figuur 10.16 is het ir-spectrum van vanilline afgebeeld.

- Noem een vibratie in eugenolmoleculen die een piek geeft in het ir-spectrum van eugenol en die niet voorkomt in het ir-spectrum van vanilline. Geef ook het absorptiegebied (in cm^{-1}) van die piek.
- Noem een vibratie in vanillinemoleculen die een piek geeft in het ir-spectrum van vanilline en die niet voorkomt in het ir-spectrum van eugenol. Geef ook het absorptiegebied (in cm^{-1}) van die piek.

Naar: CE wvo 1,2 2004-II

Je kunt nu

- uitleggen wat een kwalitatieve analyse is;
- met behulp van een ir-spectrum iets zeggen over de bindingen in een molecuul;
- de kleur van een oplossing bepalen aan de hand van een absorptiespectrum.

Thee

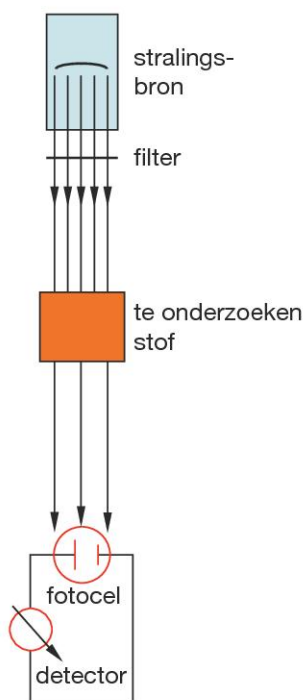
Bij het trekken van thee in heet water komen vooral geur- en smaakstoffen vrij, waaronder cafeïne: een oppeppende stof die ook in koffie en cola zit. De cafeïne in thee wordt vaak theïne genoemd. Hoe meer theebladeren er meetrokken of hoe langer je de thee laat trekken, hoe sterker hij wordt. Hoe donkerder de thee, hoe hoger de concentratie van de geur- en smaakstoffen.



Je leert

- wat het verschil is tussen kwalitatieve en kwantitatieve analyse;
- wat extinctie is en hoe je die meet met een spectrofotometer;
- wat een blanco is en hoe je een ijklijn gebruikt.

10.3 Kwantitatieve analyse



10.21 Schematische weergave van een spectrofotometer

De spectrofotometer

De concentratie van opgeloste stoffen zoals de geur- en smaakstoffen in thee kun je meten met spectrofotometrie. Bij spectrofotometrie meet je hoeveel elektromagnetische straling een stof absorbeert. De golflengte van de gebruikte straling ligt tussen 10^{-4} m (infraroodstraling) en 10^{-7} m (ultravioletstraling). Het apparaat dat hiervoor wordt gebruikt, de **spectrofotometer**, bestaat uit een stralingsbron en een detector, zie figuur 10.21. Het te onderzoeken mengsel zet je tussen de stralingsbron en de detector. Hoe meer straling er door de stof wordt geabsorbeerd, hoe minder er op de detector zal vallen.

Een spectrofotometer meet de absorptie bij één specifieke golflengte of bij meerdere golflengtes na elkaar. Spectrofotometrie geeft informatie over de bouw van moleculen, maar ook over de concentraties van stoffen in oplossingen.

Kwantitatieve analyse

Het bepalen van concentraties van opgeloste stoffen met spectrofotometrie is een **kwantitatieve analyse**. Het resultaat van een kwantitatieve analyse is een getal met een eenheid.

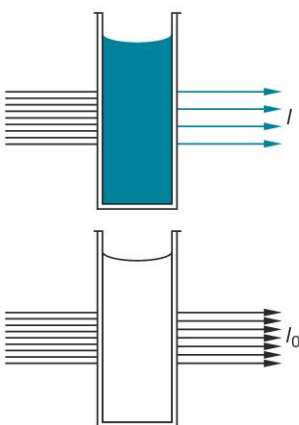
Voor een spectrofotometrische concentratiebepaling maak je met een spectrofotometer eerst een VIS-absorptiespectrum van de stof die je wilt onderzoeken, zie figuur 10.22. In dit spectrum zoek je de golflengte waarbij de sterkste absorptie plaatsvindt. Bij deze golflengte voer je de rest van de analyse uit. Van veel moleculen en ionen kun je de optimale golflengte voor de analyse ook in tabellen opzoeken.

Bij de concentratiebepaling laat je licht van de gevonden golflengte vallen door een oplossing van de te onderzoeken stof, het **monster**. Het invallende licht wordt geabsorbeerd door de stof, maar ook door het gebruikte oplosmiddel en door eventueel andere aanwezige stoffen.

● Experiment 10.2



10.22 uv/VIS-spectrofotometer



10.23 Lichtbundels door het monster (boven) en de blanco (onder)

● Experiment 10.3

Om de invloed van deze stoffen op het absorptiespectrum te meten maak je gebruik van een **blanco**. Een blanco bevat alle stoffen die zich ook in het monster bevinden, behalve de stof die je wilt onderzoeken. Als je bijvoorbeeld de concentratie van de indicator methylooranje in water bij pH = 3 bepaalt, dan is de blanco een oplossing met pH = 3 zonder methylooranje.

Je meet de intensiteit van het doorgelaten licht bij het monster en bij de blanco. De intensiteit van het licht dat door het monster gaat, geef je aan met I . De intensiteit van het licht dat door de blanco gaat, geef je aan met I_0 , zie figuur 10.23.

Net als bij ir-spectra noem je de verhouding tussen I en I_0 de transmissie T :

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Als de concentratie van de opgeloste stof 0 is, geldt $I = I_0$. De transmissie van de blanco moet je dan instellen op 1. Je kunt voor de transmissie ook een percentage gebruiken. De transmissie van de blanco is dan 100%. In de praktijk gebruik je bij spectrofotometrie meestal niet de transmissie, maar de **extinctie** (= uitdoving). Deze kun je net als de transmissie aflezen op de spectrofotometer. De extinctie is de negatieve logaritme van de transmissie: $E = -\log T$. We gebruiken de extinctie bij metingen omdat deze recht evenredig is met de concentratie van de te meten stof.

Als de concentratie van de opgeloste stof 0 is, is de transmissie 1 en de extinctie is $-\log(1) = 0$. De extinctie van de blanco stel je dus in op 0.

IJklijn

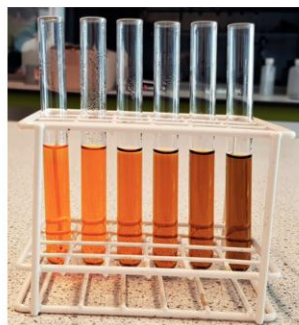
Bij het bepalen van de concentratie van bijvoorbeeld een ijzer(III)ionenoplossing maak je eerst een **ijklijn**. Hiervoor meet je de extinctie van meerdere **standaardoplossingen** met verschillende bekende concentraties ijzer(III)ionen. Zo'n reeks oplossingen met dezelfde bestanddelen als het te onderzoeken mengsel, maar dan met bekende concentraties van de te meten stof wordt een **ijkreeks** genoemd. De gemeten extincties zet je vervolgens in een grafiek uit tegen de concentraties van de standaardoplossingen uit de ijkreeks. Omdat er een recht evenredig verband is tussen de extinctie en de concentratie mag je een rechte lijn tussen de meetpunten trekken. Na het meten van de extinctie van je monster kun je de bijbehorende concentratie uit de grafiek aflezen. Ijklijnen worden ook gemaakt bij andere kwantitatieve bepalingen zoals titraties en chromatografie.



10.24 Spectrofotometrische bepaling van een ijkreeks met een oplopende concentratie ijzerthiocyanaationen

Als de stof waarvan je de concentratie wilt bepalen zelf geen kleur heeft, kun je deze niet direct meten met spectrofotometrie. Vaak wordt er dan een reactie uitgevoerd, waarbij de te bepalen stof specifiek wordt omgezet in een gekleurd reactieproduct, zie figuur 10.24. Zo reageren ijzer(III)ionen eerst met thiocynaationen (SCN^-) om rode FeSCN^{2+} -ionen te vormen die wel goed meetbaar zijn. Je bepaalt de concentratie dan indirect.

Hieronder zie je een voorbeeld van de indirecte spectrofotometrische bepaling van alcohol.



10.25 Een groen gekleurde ijkreeks van chroomionen

Voorbeeld

Om het alcoholpercentage van een onbekend drankje te bepalen, laat je de alcohol met een oplossing van kaliumdichromaat en zwavelzuur reageren:



Er ontstaan chroom(III)ionen die de oplossing groen kleuren, zie figuur 10.25. De intensiteit van de kleur is een maat voor de hoeveelheid alcohol die heeft gereageerd.

Er wordt een ijkreeks gemaakt door vanuit een standaardoplossing met 0,30% alcohol zes oplossingen te maken met elk een verschillende concentratie alcohol: de ijkreeks. Het drankje wordt 250 keer verdund met water.

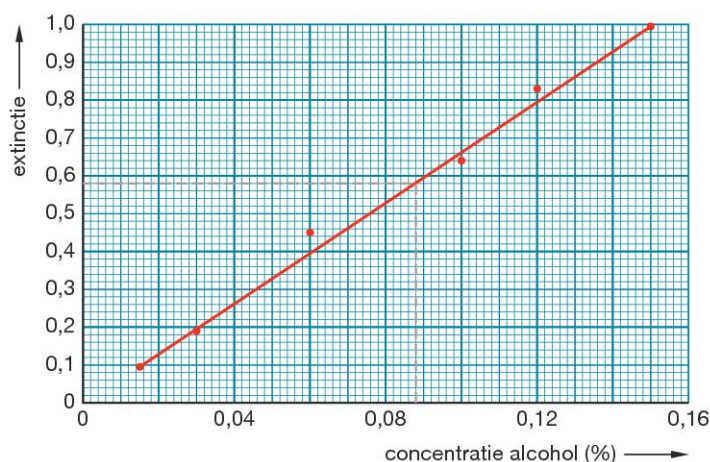
Aan 5,0 mL van de ijkoplossingen, 5,0 mL van het verdunde drankje en aan een buis met 5,0 mL water (= de blanco) wordt 5,0 mL van de oplossing van kaliumdichromaat en zwavelzuur toegevoegd. Na acht minuten in kokend water verwarmen, wordt van alle oplossingen de extinctie bij een golflengte van 585 nm gemeten. Met de blanco wordt de spectrofotometer tussen de metingen door steeds op nul gezet.

De resultaten van de metingen staan in tabel 10.26. Van de ijkoplossingen wordt een ijklijn gemaakt, zie figuur 10.27. Bij de extinctie van het verdunde drankje kun je in de grafiek aflezen dat er een concentratie van 0,085% bij hoort. Het drankje was 250 keer verdund en door toevoeging van kaliumdichromaat en zwavelzuur nog eens twee keer. Dat is in totaal 500 keer verdund. Het onderzochte drankje heeft dus een alcoholpercentage van $500 \times 0,085 = 43\%$.

● Experiment 10.4

ijkoplossing	alcoholconcentratie (%)	extinctie E
blanco	0	0
1	0,015	0,095
2	0,030	0,19
3	0,060	0,45
4	0,100	0,64
5	0,120	0,83
6	0,150	0,99
verdund drankje	...	0,57

10.26



10.27 De ijklijn

Rijpheid van fruit met je telefoon meten

De smartphone heeft al heel veel functies en dagelijks worden daar nieuwe aan toegevoegd. Wetenschappers van het MIT in Massachusetts hebben nu laten zien dat de telefoon óók de rijpheid van verschillende soorten appels kan bepalen.

Een goede spectrofotometer kost doorgaans een paar duizend euro. Alleen in een laboratorium horen ze tot de standaarduitrusting. Maar dat kan veranderen. De MIT-wetenschappers presenteren een kastje van slechts 48 g dat wordt aangesloten op een smartphone en betrouwbare rijpheidsmetingen doet. De microspectrofotometer hoeft maar weinig te kosten. Voor fruittelers is deze techniek een uitkomst.

Aan het oppervlak van het fruit meten de onderzoekers met de microspectrofotometer de concentratie van het

aanwezige chlorofyl – oftewel bladgroen, een bekende indicator voor rijpheid – en laten een smartphone de gegevens analyseren.

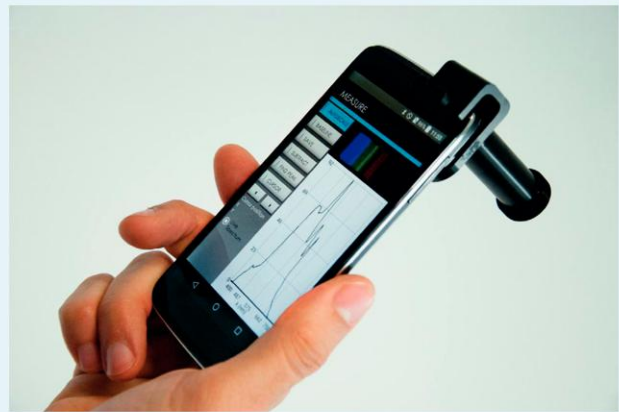
De geteste appels – bekende soorten met verschillende kleuren zoals Golden Delicious en McIntosh – lieten allemaal na verloop van tijd een afname van het chlorofylsignaal zien, dat al in eerdere onderzoeken is geassocieerd met het rijpen van het fruit.

Om het gescande fruit vervolgens echt te testen op rijpheid, werd er na de meting met een sensor in geprikt om te zien hoe zacht de appel was. De metingen met de spectrofotometer bleken een goede indicatie voor de gemeten rijpheid op basis van zachtheid.

Bron: NEMO Kennislink



10.28 Is het al rijp?



10.29 Met de iSPEX kun je je telefoon gebruiken voor kwantitatieve analyse.

● Opdracht B20

Samenvatting

- Met een spectrofotometer meet je absorptie van elektromagnetische straling.
- Met kwantitatieve analyse bepaal je een hoeveelheid stof. Voor spectrofotometrische concentratiebepalingen heb je een blanco nodig. Bij metingen met een spectrofotometer kun je gebruikmaken van de transmissie of de extinctie.
- Bij spectrofotometrie gebruik je een ijkreeks, een aantal oplossingen van een stof met bekende concentraties. Met de gemeten extincties van de ijkreeks kun je een ijklijn tekenen en zo de onbekende concentratie van een oplossing bepalen.

Opdrachten

A 15

Geef van elk van de onderstaande bepalingen aan of deze kwalitatief of kwantitatief is.

- a Bepaling van het fosfaatgehalte van cola
- b Bepaling van de aanwezigheid van anabole steroïden in het bloed van een atleet
- c Bepaling van de aanwezigheid van drugs op de kleding van een passagier op een vliegveld

A 16

- a Wat is het verschil in samenstelling tussen een monster en de blanco?
- b Waaruit bestaat de blanco bij de meting van anabole steroïden in het bloed van een atleet?

A 17

Maak onderstaande zinnen kloppend door op de puntjes *groter* of *kleiner* te zetten.

- a Als er meer licht wordt geabsorbeerd door een monster, dan is de transmissie ...
- b De extinctie is dan ...
- c De gemeten concentratie is dan ...

A 18

- a Waarom kun je een kleurloze stof niet direct meten met VIS-spectrofotometrie?
- b Hoe kun je de concentratie van die stof toch spectrofotometrisch bepalen?

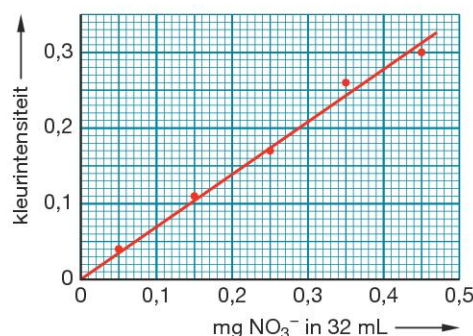
B 19

Het nitraatgehalte van drinkwater kan worden bepaald met behulp van de reactie van nitraat met salicylzuur. De beginstoffen bij deze reactie zijn kleurloos. Eén van de reactieproducten geeft aan een oplossing een gele kleur. Uit de intensiteit van de gele kleur is de nitraatconcentratie in het drinkwater af te leiden.

Bij een op de juiste wijze uitgevoerde nitraatbepaling werd eerst een ijkreeks gemaakt. Vervolgens werd van deze ijkreeks bepaald wat de intensiteit van de gele kleur na reactie met salicylzuur was. De oplossingen van deze zogenoemde ijkreeks werden gemaakt met behulp van een oplossing die 200 mg NO_3^- per liter bevatte.

- a Bereken hoeveel milligram NaNO_3 men moet afwegen om 250 mL oplossing met een gehalte van 200 mg NO_3^- per liter te verkrijgen.

Van de oplossingen van de ijkreeks bepaalde men met behulp van een spectrofotometer de kleurintensiteiten. De resultaten zijn uitgezet in figuur 10.30.



10.30 Ijklijn nitraatbepaling

Iedere oplossing van de ijkreeks had een volume van 32 mL. Daarna heeft men 20 mL drinkwater genomen en het nitraat hieruit ook op de juiste wijze met salicylzuur laten reageren. De uiteindelijk verkregen oplossing had een volume van 32 mL. De kleurintensiteit was 0,263.

- b Bereken het nitraatgehalte van het onderzochte drinkwater in milligram per liter.
- c Welke stoffen bevat de blanco bij dit experiment?

B 20

Lees de tekst in het kader 'Rijpheid van fruit met je telefoon meten' en beantwoord de volgende vragen.

- a Leg uit of je bij deze toepassing van spectrofotometrie een absorptiespectrum of een emissiespectrum meet.
- b Leg op basis van de kleur van bladgroen uit in welk golflengtegebied de microspectrofotometer zal meten.
- c Waarom hebben de onderzoekers bij hun experimenten waarschijnlijk geen ijklijn gemaakt? Gebruik in je antwoord de begrippen *kwalitatieve* en *kwantitatieve analyse*.

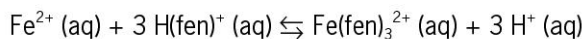
Er wordt aan getwijfeld of het apparaatje ook handig is voor consumenten.

- d Waarom is het testen van de rijpheid van fruit wel interessant voor een teler, maar niet voor een consument?

C 21 ★

Grondwater bevat Fe^{2+} - en Fe^{3+} -ionen. Het gehalte Fe^{2+} kan spectrofotometrisch worden bepaald door een reactie met orthofenantroline, verder afgekort met 'fen'.

Deze stof vormt met Fe^{2+} -ionen een dieprode verbinding, en reageert niet met Fe^{3+} -ionen. De reactie moet plaatsvinden in zuur milieu, omdat niet het fen zelf, maar het geconjugeerde zuur van fen: $\text{H}(\text{fen})^+$, met Fe^{2+} reageert:



10.31 Bemonstering van een waterput

Om te voorkomen dat de pH van de oplossing te laag is, wordt voor het aanzuren een zogenaamde buffer gebruikt met $\text{pH} = 3,5$. Een buffer zorgt ervoor dat de pH van een oplossing vrijwel constant blijft.

- a** Leg met behulp van het evenwicht uit waarom de pH van de oplossing niet te laag mag zijn.

Het resultaat van metingen aan een ijkreeks voor dit experiment staat hiernaast in tabel 10.32.

Fe^{2+} -gehalte (mg L^{-1})	transmissie (%)
0,0	100
1,0	62
2,0	40
3,0	25
4,0	15
5,0	10
6,0	6

10.32

- b** Bereken uit de gegeven meetwaarden voor de transmissie de extincties en teken de ijklijn op millimeterpapier; zet de extinctie uit tegen het ijzer(II)-gehalte.

Voor een ijzer(II)bepaling wordt 25 mL gefiltreerd grondwater in een 100 mL maatcilinder gebracht. Vervolgens wordt hieraan 5 mL 1 M orthofenantroline-oplossing toegevoegd, waarna met een oplossing ($\text{pH} = 3,5$) wordt aangevuld tot 50 mL. De gemeten extinctie van de oplossing is 0,55.

- c** Bereken het Fe^{2+} -gehalte van het grondwater in mg L^{-1} .

Experimenten

10.2 Kleurenblind en toch kleuren herkennen

Ontwerp een methode om kleuren vast te stellen als je kleurenblind bent.

10.3 Fosfaatgehalte in water

Onderzoek naar de concentratie van fosfaationen in oppervlaktewater.

10.4 Thiocynaat in speeksel

Een spectrofotometrische bepaling van thiocynaat in speeksel.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen hoe een spectrofotometer werkt;
- kwantitatieve en kwalitatieve analyses van elkaar onderscheiden;
- uitleggen wat een blanco is en hoe je die gebruikt bij een bepaling;
- uitleggen wat extinctie is;
- uitleggen wat een ijkreeks is en hoe je die maakt;
- een ijklijn gebruiken bij een kwantitatieve bepaling.

Vervalsing

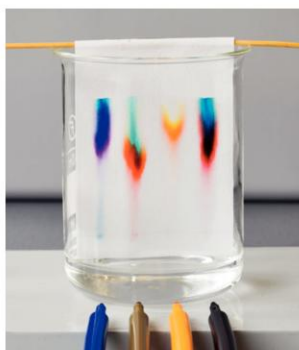
Hiernaast zie je het schilderij De Emmaüsgangers. Het is geheel in de stijl van Johannes Vermeer inclusief de gebruikte materialen en verf. Het is echter een vervalsing van de Nederlander Han van Meegeren. Het heeft jaren als een echte Vermeer gehangen in het museum Boijmans Van Beuningen. Met behulp van de analyse-methode chromatografie heeft men aangetoond dat het een knappe vervalsing is.



Je leert

- wat chromatografie is;
- de verschillende vormen van chromatografie van elkaar te onderscheiden;
- hoe je chromatografie gebruikt voor kwalitatieve en kwantitatieve bepalingen.

10.4 Chromatografie



10.33 Papierchromatografie

Papierchromatografie

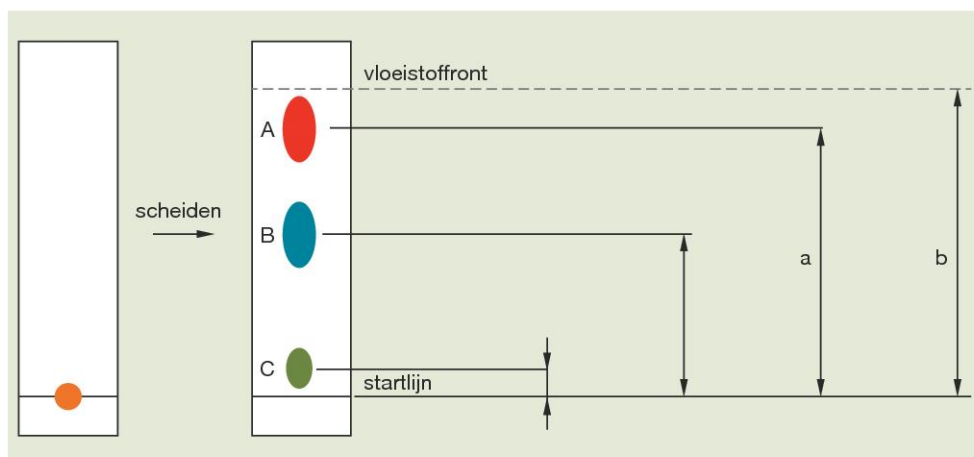
Om de vervalsing van Van Meegeren aan te tonen was kostbare chromatografieapparatuur nodig. In de derde klas heb je al eens gewerkt met een eenvoudigere en dus goedkopere vorm van chromatografie: **papierchromatografie**. Hiermee kun je bijvoorbeeld een mengsel van kleurstoffen in inkt of in M&M's scheiden.

Deze scheidingsmethode maakt gebruik van het verschil in oplosbaarheid van de stoffen in de **loopploeistof** en het verschil in aanhechtingsvermogen aan het chromatografiepapier. Hoe beter een stof in de loopploeistof oplost, hoe hoger de stof op het papier terechtkomt. Een stof die goed aan het papier hecht, zal lager op het papier achterblijven. De loopploeistof noem je de **mobiele fase** en het papier de **stationaire fase**. Het resultaat van chromatografie is een **chromatogram**.

Met chromatografie kun je gemakkelijk zien welke stoffen in een mengsel zitten. Je gebruikt daarvoor een referentiestof. Als een stof in je mengsel op het papierchromatogram even hoog komt als je referentiestof, is de kans groot dat die stof in je mengsel aanwezig is. Je kunt bij het identificeren van stoffen op een papierchromatogram ook gebruikmaken van de **Rf-waarde** (figuur 10.34). De definitie is:

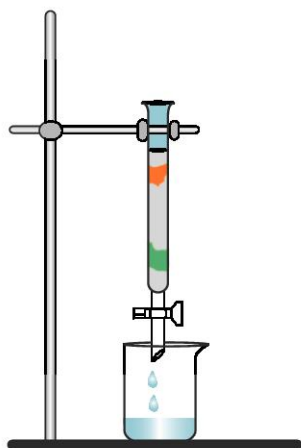
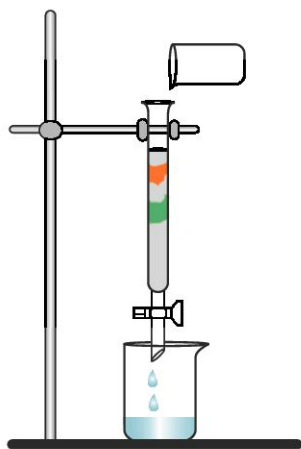
$$R_f = \frac{\text{afstand van startlijn tot middelpunt van een vlek}}{\text{afstand van startlijn tot vloeistoffront}}$$

Bij gelijkblijvende omstandigheden (temperatuur, loopploeistof, papiersoort) is de Rf-waarde karakteristiek voor een stof.

10.34 Chromatogram: de R_f -waarde van stof A is a/b .

● Experiment 10.5

● Experiment 10.6

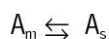


10.35 Weergave van de scheiding bij kolomchromatografie

Tegenwoordig gebruik je in plaats van papier als stationaire fase meestal plaatjes van plastic, metaal of glas, waarop een dunne laag silica (SiO_2) is aangebracht. De techniek heet dan dunnelaagchromatografie, in het Engels afgekort als **TLC** (*Thin Layer Chromatography*). Behalve papierchromatografie en TLC zijn er meer vormen van chromatografie, maar bij alle chromatografiemethoden is er sprake van een mobiele fase en een stationaire fase.

Principe van de scheiding

Bij alle vormen van chromatografie berust de scheiding op een verdeling van stoffen over de mobiele fase en de stationaire fase. Dit is een toepassing van het verdelingsevenwicht zoals je dat in hoofdstuk 3 en 7 hebt geleerd. Als we uitgaan van stof A in contact met een stationaire fase en een mobiele vloeistoffase, dan stelt zich bij de verdeling het volgende evenwicht in:



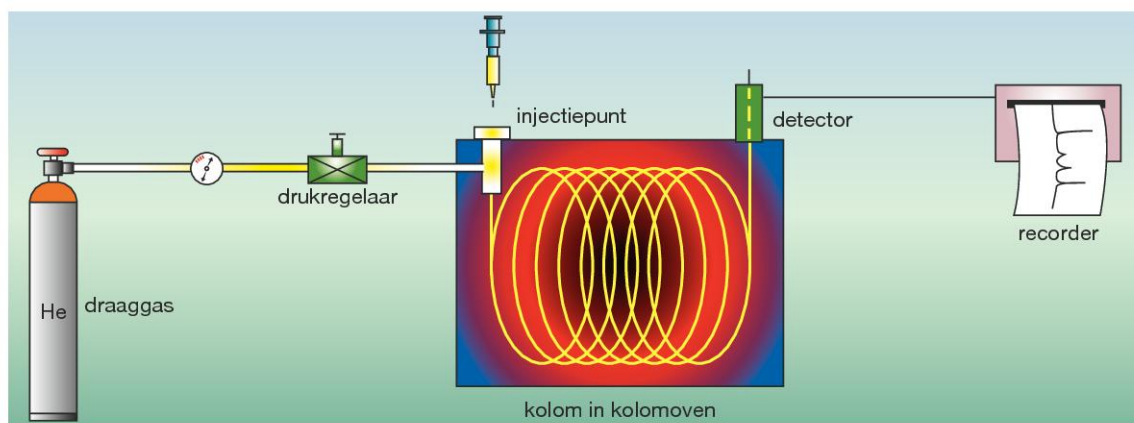
De evenwichtsvoorwaarde is dan:

$$K_v = \frac{[A]_s}{[A]_m}$$

Als stof A een voorkeur heeft voor de mobiele fase zal het grootste deel van stof A worden meegenomen in de mobiele fase. Stof A komt dan in een gedeelte van de stationaire fase waar nog geen stof A aanwezig is. Er treedt een evenwichtsverschuiving op en stof A hecht aan de stationaire fase, maar zal even later weer worden meegenomen in een nieuw deel van de mobiele fase, dat later langskomt. Er is dus een voortdurende uitwisseling van stof A tussen de mobiele en de stationaire fase. Afhankelijk van de voorkeur van de stof voor de mobiele fase of de stationaire fase zal de stof op een andere plaats in het chromatogram eindigen.

Kolomchromatografie

Wetenschap en industrie gebruiken kolomchromatografie bij onderzoek en productie. De scheiding van een mengsel verloopt niet op papier, maar in een kolom, zie figuur 10.35. Een kolom is een dunne buis waarin zich de stationaire fase bevindt. De mobiele fase kan een gas of een vloeistof zijn en deze neemt het mengsel vanuit het injectiepunt mee. Omdat de stoffen in een mengsel korter of juist langer zijn gebonden aan de stationaire fase, komen ze gescheiden van elkaar uit de kolom. Aan het eind van de kolom meet je de stoffen met een detector. Wanneer de mobiele fase een vloeistof is noem je de methode **vloeistofchromatografie**, is de mobiele fase een gas, dan is er sprake van **gaschromatografie** (figuur 10.36).



10.36 Schema van de belangrijkste onderdelen van een gaschromatograaf

Bij deze analysetechnieken is de tijd die een stof in de kolom verblijft voordat hij bij de detector komt de bepalende factor. Deze tijd heet de **retentietijd**, afgekort als t_R . Dit in tegenstelling tot papierchromatografie waarbij de afgelegde afstand verschilt. Elke stof heeft zijn eigen retentietijd die je kunt aflezen uit het chromatogram. Deze retentietijd is onder andere afhankelijk van het soort kolom, de temperatuur en de stroomsnelheid van de mobiele fase. De scheiding in de kolom komt tot stand door de specifieke eigenschappen van de stationaire fase. Zo bewegen apolaire stoffen in een kolom met een apolaire stationaire fase langzaam en deze stoffen komen dus later uit de kolom dan polaire stoffen. Bij een polaire kolom is het net andersom.



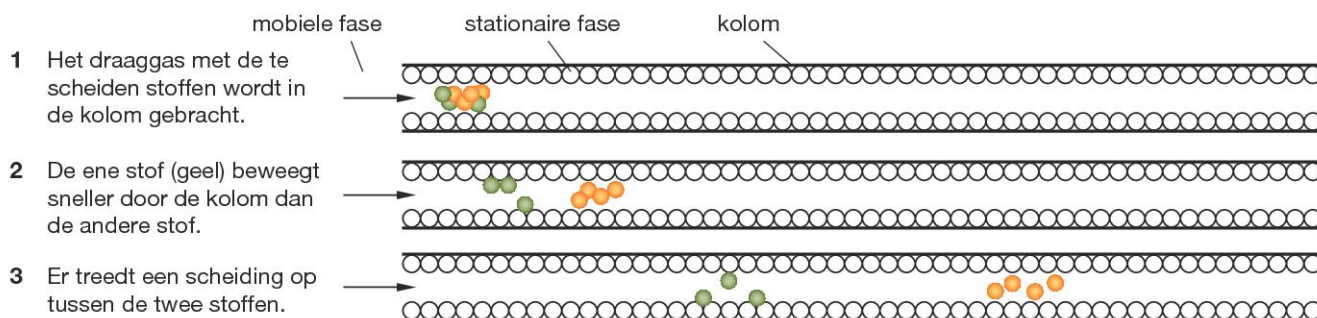
10.37 Verschillende typen kolommen die je kunt gebruiken bij gaschromatografie

Vloeistofchromatografie

Bij vloeistofchromatografie, meestal HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) genoemd, wordt het te onderzoeken mengsel opgelost. De kolom is gepakt met heel kleine bolletjes silica met daarop een dun laagje van de stof die als stationaire fase fungeert. Onder hoge druk (200 tot 1000 bar) wordt een vloeistof (mobiele fase) met de stoffen uit het te onderzoeken mengsel door de kolom geleid. Als mobiele fase gebruik je bijvoorbeeld water, hexaan of methanol.

Gaschromatografie

Bij analyses met een gaschromatograaf wordt het te onderzoeken mengsel verhit, waardoor alle stoffen verdampen. De ontstane gassen worden met een draaggas in een kolom geleid. De kolom is veel langer dan bij vloeistofchromatografie, vaak meer dan tien meter. Aan de binnenkant van de kolom zit een dunne poreuze laag dragermateriaal waarin zich de stationaire fase bevindt. Als draaggas gebruik je bijvoorbeeld helium of stikstof. Het principe van de scheiding zie je in figuur 10.38 op de volgende bladzijde.

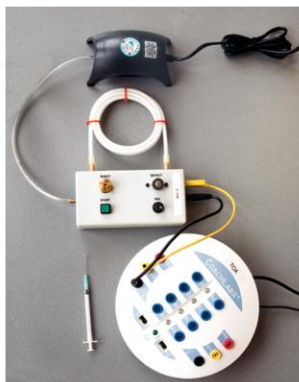


10.38 Scheiding van een mengsel met een gaschromatograaf

Analyse van het chromatogram

In het vloeistof- of gaschromatogram staat op de horizontale as de tijd. De sensor in de detector geeft meestal een spanning af die verandert als een stof passeert. Op de y-as staat daarom vaak de grootte spanning (U) in volt (V), maar ook andere grootheden zijn mogelijk. Met kolomchromatografie zijn zowel kwalitatieve als kwantitatieve analyses mogelijk.

● Experiment 10.7



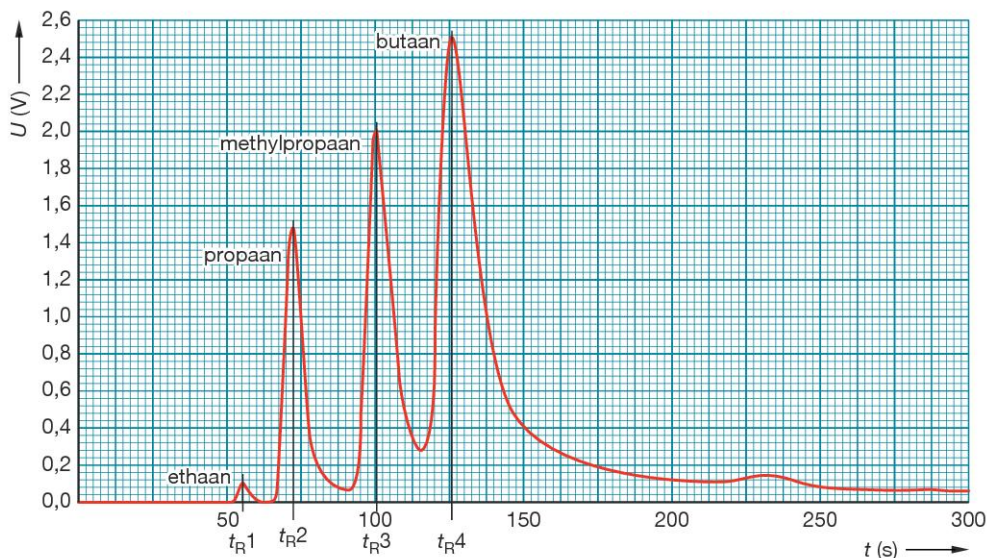
10.39 Een opstelling van de Nano-GC op school

Kwalitatieve analyse

Bij een kwalitatieve analyse wil je alleen weten uit welke stoffen je mengsel bestaat en niet de concentratie van elke stof. Je maakt dan gebruik van de retentietijden in je chromatogram. In tabellen zijn voor een aantal stoffen retentietijden te vinden die horen bij een bepaalde kolom. Met behulp van deze retentietijden kun je het chromatogram analyseren. In figuur 10.40 zie je een gaschromatogram gemaakt met de Nano-GC, een kleine gaschromatograaf voor gebruik op school (figuur 10.39). Uit de pieken in het chromatogram en de tabel met retentietijden blijkt dat het mengsel minstens vier stoffen bevat en welke stoffen het zijn.

Kwantitatieve analyse

Uit een chromatogram is ook af te leiden wat de concentratie van de verschillende stoffen in het mengsel is. De oppervlakte van een piek in een chromatogram is namelijk recht evenredig met de concentratie van die stof in het mengsel. De oppervlakte van de pieken in het chromatogram kun je bepalen met behulp van een computer die is aangesloten op de detector.



10.40 Gaschromatogram van een mengsel van alkanen



10.41 Een professionele gaschromatografie-opstelling in een laboratorium

Stel je hebt een mengsel van vier stoffen en van dit mengsel maak je chromatogram A. Dit chromatogram heb je geanalyseerd met behulp van de retentietijden. Je wilt ook weten wat de concentratie van de vier stoffen in je mengsel is. Je maakt nu een mengsel van de vier stoffen met een bekende concentratie. Dit mengsel laat je onder dezelfde omstandigheden door de kolom gaan. In dit nieuwe chromatogram B bereken je de verhouding tussen de concentratie en de piekoppervlakte van de stoffen. Met deze verhoudingen kun je dan in chromatogram A uit de piekoppervlakten de concentraties van de stoffen in je oorspronkelijke mengsel berekenen, zie het voorbeeldkader hieronder.

Voorbeeld

Vroeger zat in pijnstillers vaak de stof fenacetine. Omdat dit in kleine hoeveelheden al giftig bleek en zorgde voor meer bijwerkingen is deze stof verboden.

Onderzoek of er fenacetine in een bepaalde pijnstiller zit en bepaal de concentratie fenacetine in de oplossing van de pijnstiller.

Neem de pillen in een oudere verpakking pijnstillers, los de pijnstiller op in water en scheid het mengsel met een vloeistofchromatograaf. Er ontstaat chromatogram 1 dat je ziet in figuur 10.42a. Je injecteert nu een oplossing van fenacetine in de chromatograaf. Het resultaat zie je in chromatogram 2, figuur 10.42b.

Gegeven is nog:

Piekoppervlakte van fenacetine in chromatogram 1: $2,1 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$

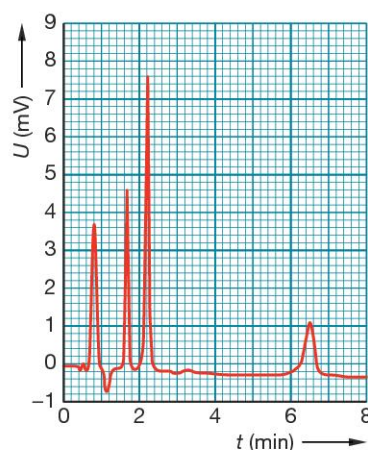
Piekoppervlakte van fenacetine in chromatogram 2: $3,6 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$

Geïnjecteerde concentratie fenacetine bij chromatogram 2: $1,60 \cdot 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$

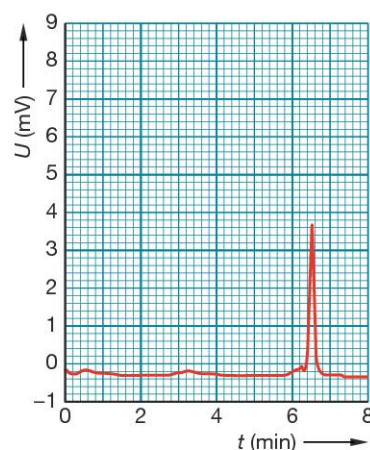
De piek in chromatogram 2 heeft een retentietijd van 6,5 min. De piek op dezelfde plek (met dezelfde retentietijd) in chromatogram 1 komt dus overeen met fenacetine. Er zit dus fenacetine in de oude verpakking.

De fenacetine-oplossing die je injecteert bij de tweede meting heb je zelf gemaakt. De concentratie daarvan ken je dus precies. Met behulp van de oppervlaktes van de fenacetinepieken in beide chromatogrammen kun je nu de concentratie fenacetine in de pijnstilleroplossing bepalen. De concentratie fenacetine die behoort bij chromatogram 1 is:

$$\frac{2,1 \cdot 10^{-2}}{3,6 \cdot 10^{-2}} \times 1,60 \cdot 10^{-4} = 9,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$$



10.42a Chromatogram 1: een oplossing van een pijnstiller



10.42b Chromatogram 2: een oplossing van fenacetine

Forensische benzineanalyse

Er is brand gesticht. De technische recherche treft een jerrycan met benzineresten aan op de plek van de brand, de plaats delict. Op camerabeelden van het tankstation in de buurt is te zien dat Louw J. eerder die dag benzine in een gelijkende jerrycan tankt.

Is Louw J. de dader van de brandstichting? Dat is de vraag die de tactische rechercheurs van de politie willen beantwoorden.

De resten van de benzine en monsters van het tankstation en diverse tankstations in de omgeving worden naar het Nederlands Forensisch Instituut (NFI) gestuurd. Daar vergelijken forensisch onderzoekers de benzines. Dat doen ze met gaschromatografie.

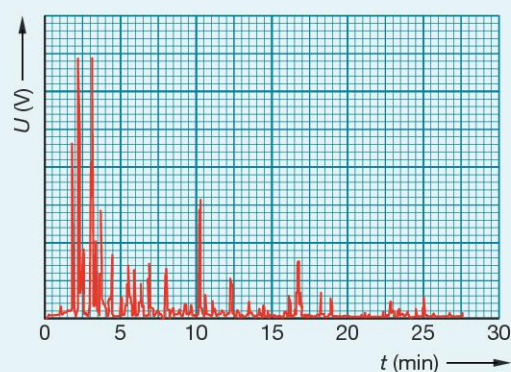
Benzine is kleurloos en bestaat uit een mengsel van koolwaterstoffen met doorgaans 4 tot circa 12 koolstofatomen, met name uit vertakte alkanen en moleculen met een benzeenring, zoals toluene en xyleen. Ondanks wat je door de naam zou verwachten, bevat moderne benzine weinig tot geen benzeen. Dit is verwijderd omdat het kankerverwekkend is. Ook zwavelverbindingen zijn verwijderd om luchtverontreiniging tegen te gaan.

Aan benzine die als brandstof wordt gebruikt, worden additieven (ook wel dopes genoemd) toegevoegd, onder andere om te voorkomen dat de motor onregelmatig gaat lopen (ook wel kloppen of pingelen genoemd).

Om de klopvastheid van benzine te vergroten werd vroeger tetra-ethyllood (TEL, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) toegevoegd.

Er waren maar zeer kleine hoeveelheden nodig, maar door het zeer grote verbruik van benzine vormde TEL de grootste bron van loodvervuiling in het milieu. Tegenwoordig is benzine loodvrij en wordt er methyl-tert-butyl-ether (MTBE, 2-methoxymethylpropan) toegevoegd aan benzine om het kloppen van de motor te voorkomen.

De benzines van verschillende tankstations verschillen een klein beetje van elkaar in samenstelling. Met chromatografie kun je dit verschil meten. In figuur 10.43 zie je een voorbeeld van een chromatogram van benzine.



10.43 Een chromatogram van benzine

Uit het onderzoek blijkt dat de benzine uit de jerrycan en specifiek die van het tankstation van Louw J. identiek zijn. Louw J. wordt opgepakt en ondervraagd. Hij bekent en de misdaad is opgelost.

● Opdracht B25

Samenvatting

- Bij chromatografie scheid je stoffen op basis van de oplosbaarheid in een mobiele fase en het aanhechtingsvermogen aan een stationaire fase. Voor de identificatie van stoffen bij papierchromatografie kun je gebruikmaken van de R_f -waarde.
- De verdeling van stoffen in de chromatografie over de mobiele en de stationaire fase is een verdelingsevenwicht.
- Bij kolomchromatografie vindt de scheiding plaats in een kolom waarin zich de stationaire fase bevindt. De mobiele fase is een vloeistof of een gas. De retentietijd is de tijd die een stof uit een mengsel in de kolom verblijft. De kolom kan een polaire of apolaire stationaire fase hebben en de stoffen worden dan gescheiden op basis van hun polariteit.
- Met kolomchromatografie kun je kwalitatief en kwantitatief de samenstelling van een mengsel bepalen. De retentietijden in een chromatogram gebruik je om te analyseren uit welke stoffen het mengsel bestaat. Uit de piekoppervlakte in het chromatogram kun je de concentratie bepalen.

Opdrachten

A 22

Op basis van welke twee stofeigenschappen scheid je stoffen bij chromatografie?

A 23

Maak onderstaande zinnen kloppend door op elk van de open plekken *groot* of *klein* in te vullen.

- a De oplosbaarheid van een stof die hoog op een papierchromatogram eindigt is ...
- b Het adsorptievermogen van die stof is ...
- c De retentietijd van een stof die goed hecht aan de stationaire fase is ...
- d De retentietijd van hexaan op een polaire kolom is ...

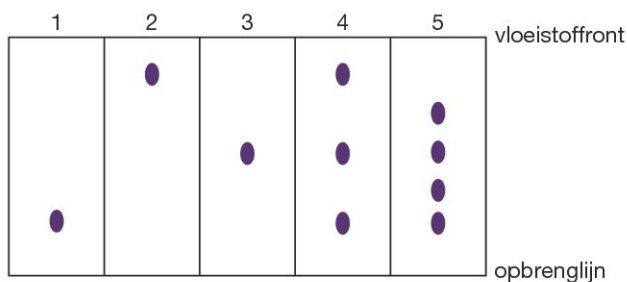
B 24

Op een dunnelaagplaatje gecoat met silica wordt op 1 cm van de onderkant een druppel van elk van de volgende stoffen of mengsels van stoffen aangebracht:

- 1 asparaginezuur
- 2 leucine
- 3 lysine
- 4 een mengsel van 1, 2 en 3
- 5 sinaasappelsap

De stoffen 1, 2 en 3 zijn aminozuren.

Het dunnelaagplaatje wordt in een bekeerglas geplaatst met een loopvloeistof, bereid uit gelijke delen ethanol en 0,08 M ammonia. Na enige tijd wordt het dunnelaagplaatje eruit gehaald, gedroogd en besproeid met een ninhydrine-oplossing. De aminozuren verschijnen als paarse en violette vlekken, zie figuur 10.44.



10.44 Chromatogram van de analyse van sinaasappelsap

- a Leg uit welk aminozuur of welke aminozuren in ieder geval in sinaasappelsap zit(ten).
- b Bepaal de R_f -waarde van de drie aminozuren.
- c Wat is bij deze proef de stationaire fase en wat is de mobiele fase?

B 25

Lees de tekst in het kader 'Forensische benzineanalyse' en beantwoord de volgende vragen.

- a Geef de systematische naam van een vertakte alkaan dat in benzine zit.
- b Geef de structuurformules van toluene (methylbenzeen) en MTBE.
- c Leg uit hoeveel structuurisomeren xyleen heeft. Gebruik Binas tabel 66A.
- d Welke milieuvervuilende stof ontstaat bij verbranding van zwavelverbindingen?
- e Noem een kwalitatief en een kwantitatief verschil dat je met chromatografie tussen benzines van twee tankstations zou kunnen vinden.
- f Leg voor elk van de verschillen uit hoe je dat kunt zien in de chromatogrammen van de verschillende benzines.

In het rapport van de forensische onderzoeker van het NFI zal niet gestaan hebben dat Louw J. de dader is. Het NFI wijst nooit daders aan.

g Waarom wijst het NFI geen daders aan?

B 26

Een mengsel van propaan, pentaan, ethanol, ethaan-1,2-diol en ether wordt met behulp van gaschromatografie gescheiden op een polaire kolom. Leg uit in welke volgorde de stoffen langs de detector komen.

B 27 THC

Cannabis Sativa is de plant waar hasj en wiet van worden gemaakt. Beide drugs bevatten THC, een stof die je bewustzijn verandert. Na inname van deze stof neem je je omgeving anders waar. Om aan te tonen of iemand hasj of wiet heeft gebruikt kun je het THC-gehalte in urine meten. Jorn wordt het ziekenhuis binnengebracht. Hij is volkomen in de war en de artsen vermoeden dat hij drugs heeft gebruikt. Ze analyseren de urine van Jorn op een gaschromatograaf om te zien of er THC in zit. THC hecht goed aan de stationaire fase in de kolom die de onderzoekers in het ziekenhuis gebruiken.

- a Leg uit of de retentietijd van THC groot of klein is.

THC is een zeer apolaire stof.

- b Leg uit of de kolom die de onderzoekers hebben hebben polair of apolair is.

Om te weten waar ze THC moeten zoeken in het chromatogram van urine moeten de onderzoekers de retentietijd van THC weten.

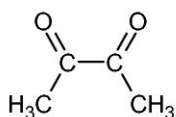
- c** Leg uit hoe onderzoekers de retentietijd van THC via chromatografie kunnen bepalen.

Door middel van chromatografie kun je ook de hoeveelheid van een stof bepalen.

- d** Leg uit welk gegeven uit het chromatogram met de THC-piek je daarvoor zou gebruiken.
e Leg uit wat de onderzoekers moeten doen om de hoeveelheid THC in het chromatogram nauwkeurig te bepalen.

C 28 Diacetyl in bier ★

Eén van de angsten van bierbrouwers is dat hun product een slechte smaak heeft. Een slechte smaak kan worden veroorzaakt door diacetyl, zie de structuurformule hieronder.



Diacetyl geeft bier een botersmaak. Richard bepaalt de concentratie diacetyl in bier met behulp van vloeistofchromatografie.

Hij injecteert een oplossing van zuiver diacetyl met bekende concentratie. Het resultaat is chromatogram 1. Vervolgens injecteert hij, onder dezelfde omstandigheden als bij chromatogram 1 en op dezelfde kolom, een hoeveelheid bier. Zo ontstaat chromatogram 2. Hij bepaalt van de diacetylpieken in elk chromatogram de oppervlakte. De resultaten staan hieronder in tabel 10.45.

	piekoppervlakte
chromatogram 1	12,25 cm ²
chromatogram 2	7,89 cm ²

10.45

De concentratie van het zuiver diacetyl dat Richard heeft gebruikt is 50 mg L⁻¹.

- a** Bepaal met bovenstaande gegevens de concentratie diacetyl in mmol L⁻¹ in het bier van Richard.

Richard injecteerde een standaardoplossing zuiver diacetyl met bekende concentratie om voor die stof het verband tussen de concentratie en de oppervlakte te bepalen. Hij moest uit chromatogram 1 echter ook een tweede gegeven halen dat hij bij de analyse van chromatogram 2 nodig had.

- b** Leg uit welk gegeven dit is.

Meestal wordt bij dit soort analyses niet één standaardoplossing gemeten, maar een reeks oplossingen met oplopende concentratie. Hieruit wordt dan een ijklijn gemaakt.

- c** Leg uit waarom het beter is om een reeks standaardoplossingen te meten.

Naar: CE vwo 2010-I



10.46 Bierbrouwers zijn bang voor de stof diacetyl, die een botersmaak aan bier geeft.

Experimenten

10.5 Chromatografie van aminozuren

Onderzoek naar de samenstelling van een mengsel aminozuren.

10.6 Schuldig of onschuldig?

Onderzoek naar de dader van een misdrijf.

10.7 Analyse met de Nano-GC

Onderzoek naar de samenstelling van aanstekergas.

- Volledige instructie Chemie Overal online

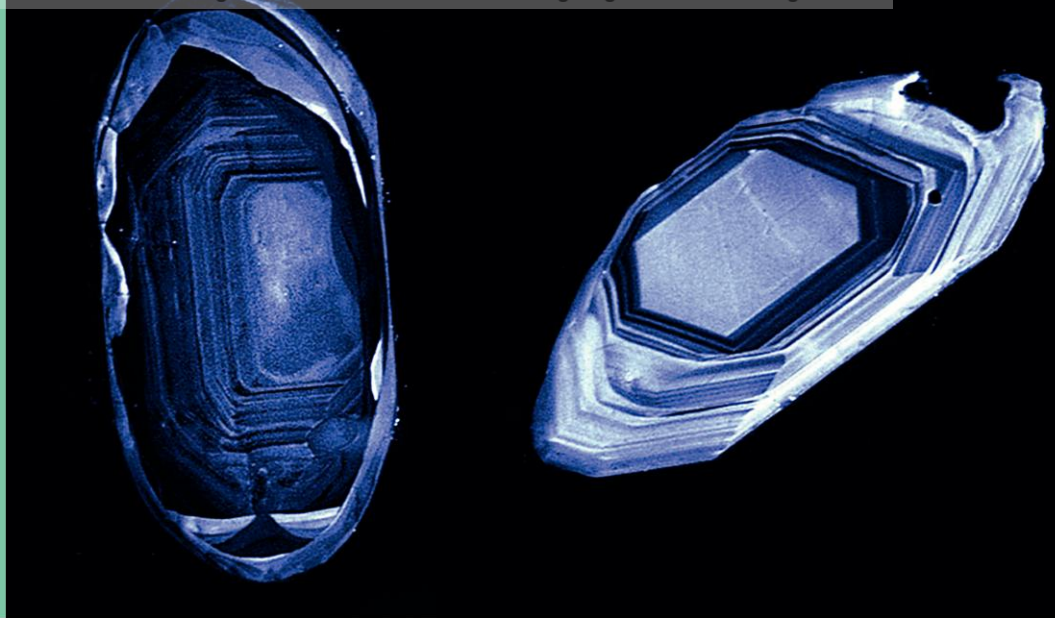
Je kunt nu

- uitleggen wat chromatografie is;
- het principe van en de verschillende soorten chromatografie benoemen;
- chromatogrammen kwalitatief en kwantitatief analyseren.

Hoe oud is de aarde?

Volgens de wetenschap is de aarde 4,6 miljard jaar oud. Dat volgt uit de bepaling van de ouderdom van de oudste mineralen die op aarde zijn gevonden. Het gaat daarbij om kleine zirkoonkristallen uit de Jack Hills in West-Australië.

Hoe oud iets is wordt vaak bepaald met behulp van de isotopoverhouding. Deze bepaal je met massaspectrometrie.

**Je leert**

- wat er in een massaspectrometer gebeurt;
- wat radicalen zijn;
- hoe je massaspectrometrie gebruikt voor kwalitatieve en kwantitatieve bepalingen.

10.5 Massaspectrometrie

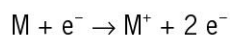
Meten met massaspectrometrie

De ouderdom van de zirkoonkristallen is vastgesteld met de uranium-loodmethode. Deze methode meet het radioactief verval van uranium naar lood. De vervaltijd (halfwaardetijd) van uraniumisotopen is bekend en dus kun je uit de verhouding tussen uranium- en loodisotopen de ouderdom van materiaal bepalen. Om die verhouding te bepalen maak je gebruik van de analysemethode **massaspectrometrie**.

Je brengt daarbij een monster van de te onderzoeken stof in een **massaspectrometer**. De moleculen van de stof krijgen in de massaspectrometer een lading (ionisatie). Deze meestal positieve moleculen vallen snel in brokstukken uiteen (fragmentatie). De detector meet de massa en de relatieve hoeveelheid van alle **geladen** deeltjes en geeft dit weer in een **massaspectrum**.

De massaspectrometer

In een massaspectrometer (zie figuur 10.48) wordt een stof geïoniseerd door een elektronenbundel in een vacuümruimte. Getroffen moleculen kunnen dan elektronen verliezen of opnemen. Er ontstaan hoofdzakelijk eenwaardige positieve ionen:

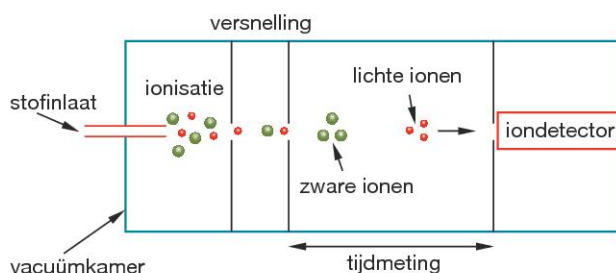


Het positieve 'molecuulion' (M^+) is onstabiel, waardoor het snel uiteenvalt. Hierbij ontstaan onder andere positief geladen deeltjes, die weer verder uiteen kunnen vallen. De geladen deeltjes (ionen) worden in een elektrisch veld versneld. De ionen komen uiteindelijk bij een detector. Doordat de massa van de deeltjes varieert, varieert ook de versnelling.



10.47 De Dode Zeerollen zijn volgens massaspectrometrische metingen van het verval van C^{14} -isotopen (' C^{14} -datering') ongeveer 100 jaar voor Christus geschreven.

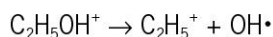
Deeltjes met een grote massa doen er langer over om de detector te bereiken dan deeltjes met een kleine massa. Ook de lading bepaalt de tijd tot de deeltjes de detector bereiken. Zo treedt er een scheiding op naar massa (in u) gedeeld door lading: m/z . De lading (z) is bij de meeste ionen 1, dus vaak is het direct de massa die je meet.



10.48 Schematische weergave van een massaspectrometer

Radicalen

Bij fragmentatie ontstaan er naast ionen ook radicalen. Radicalen zijn niet-geladen deeltjes en zijn niet zichtbaar in het massaspectrum. Zo kan een ethanol-ion bijvoorbeeld fragmenteren tot een ethyl-ion en een hydroxylradicaal:

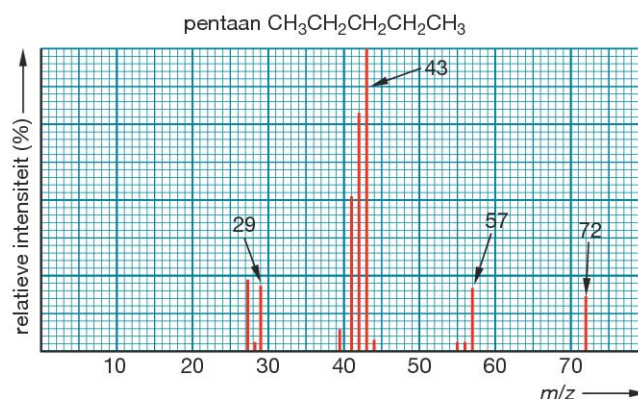


Een **radicaal** is een deeltje met een oneven aantal elektronen waardoor er een ongepaard elektron voorkomt op een van de atomen. Door het ongepaarde elektron voldoet een radicaal niet aan de octetregel. In een hydroxylradicaal heeft het zuurstofatoom één ongepaard elektron. Dit wordt weergegeven door het losse elektron als een stip achter de formule te zetten.

Massaspectrum

De detector van een massaspectrometer registreert niet alleen de massa van de ionen, maar ook de relatieve intensiteit. De intensiteit is een maat voor het aantal deeltjes dat de detector heeft gemeten. In een **massaspectrum** staat op de horizontale as m/z en op de verticale as de relatieve intensiteit. Het grootste aantal deeltjes (de hoogste piek) is daarbij op 100% gesteld. De pieken in een massaspectrum zijn zeer scherp en zien eruit als verticale lijnen. Net als bij kolomchromatografie is met massaspectrometrie een kwalitatieve en een kwantitatieve analyse mogelijk.

In voorbeeld 1 wordt het massaspectrum van pentaan (figuur 10.49) toegelicht.



10.49 Vereenvoudigd massaspectrum van pentaan



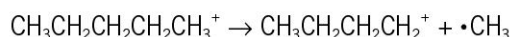
10.50 Na het verbod op chloorfluorkoolwaterstoffen (cfk's) als koelmiddel in koelkasten wordt nu onder andere pentaan als koelmiddel gebruikt.

Voorbeeld 1

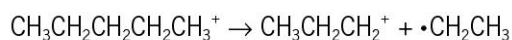
In figuur 10.49 zie je een massaspectrum van pentaan. Welke deeltjes horen bij de aangegeven pieken in het massaspectrum van pentaan?

De piek uiterst rechts in een massaspectrum is van het ion met de grootste massa. Dit is meestal de 'molecuul-ionpiek' (het ion van het totale niet-gefragmenteerde molecuul). Hieruit kan de molecuulmassa dus direct worden afgelezen. In het massaspectrum is dat de piek bij $m/z = 72$. De overige pieken zijn de geïoniseerde fragmenten van het molecuul pentaan. Massa's van veelvoorkomende fragmenten zie je in Binas tabel 39D onderaan.

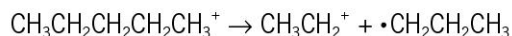
De deeltjes met $m/z = 57$ ontstaan door afsplitsing van methylgroepen ($m/z = 15$) van pentaanmoleculen. Het is een $C_4H_9^+$ -ion:



De piek bij $m/z = 43$ kun je verklaren door ervan uit te gaan dat het pentaanion ook in twee andere fragmenten uiteen kan vallen. Er ontstaat een ion met drie C-atomen en een radicaal met twee C-atomen.



De piek bij $m/z = 29$ behoort bij een ethylion $CH_3CH_2^+$.



De andere lijnen in het spectrum zijn moeilijker te verklaren. Pieken met een m/z -waarde van één of twee minder dan de hier genoemde pieken zijn meestal het gevolg van het verliezen van een of meer H-atomen tijdens de fragmentatie. Het kunnen ook isotopen zijn.

Kwalitatieve analyse

Bij kwalitatieve massaspectrometrie kun je de structuur van een molecuul vaststellen. Je weet de molecuulmassa uit de 'molecuul-ionpiek'. Door vervolgens te puzzelen met de massa's van kleinere fragmenten is de molecuulstructuur (geheel of gedeeltelijk) met redelijke zekerheid vast te stellen. In Binas tabel 39D vind je de massa en de structuur van een aantal veelvoorkomende fragmenten.

Het gemeten massaspectrum kun je vergelijken met referentiespectra in een computerbestand. Een massaspectrum is zo kenmerkend voor een stof dat een zeer betrouwbare identificatie kan worden verkregen. Dit pas je bijvoorbeeld toe bij dopingcontroles, bij het aantonen van verboden stoffen in voedingsmiddelen of bij sporenonderzoek bij een misdrijf.

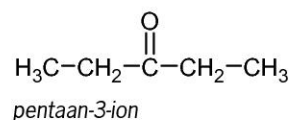
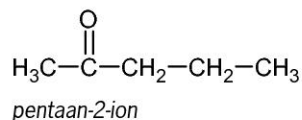
Bij het fragmenteren van moleculen zijn sommige fragmenten stabielere dan andere. Fragmenten met een C=O-groep zijn relatief stabiel. Je ziet dat in de massaspectra van ketonen. Deze stoffen zullen stabiele fragmenten maken met een positieve lading op de C=O-groep. In voorbeeld 2 zie je hoe je met massaspectrometrie kunt uitzoeken of je bij pentanon hebt te maken met pentaan-2-on of pentaan-3-on.



10.51 De speciale geur en smaak van blauwaderkaas komt onder andere van ketonen zoals pentaan-2-on.

Voorbeeld 2

Is het massaspectrum in figuur 10.52 van pentaan-2-on of van pentaan-3-on?

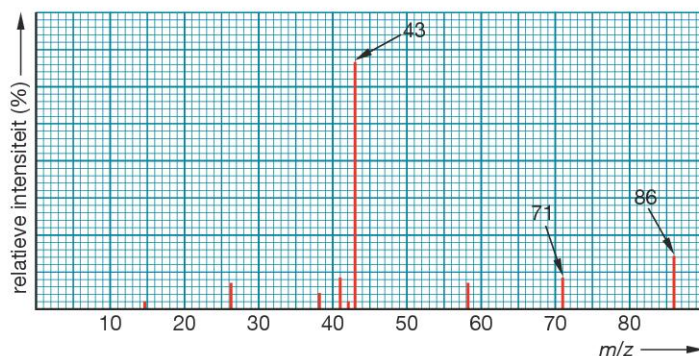


De 'molecuul-ionpiek' is voor allebei de stoffen hetzelfde, want beide stoffen hebben dezelfde massa.

Bij pentaan-2-on ontstaan er twee verschillende fragmenten $[\text{CH}_3\text{CO}]^+$ en $[\text{COCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3]^+$. Bij pentaan-3-on ontstaat er maar één soort fragment met een C=O-groep: $[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}]^+$.

In figuur 10.52 zie je een piek bij $m/z = 71$ en $m/z = 43$. Dit komt overeen met de massa's van de fragmenten van pentaan-2-on. Je ziet geen piek bij $m/z = 57$, de massa van het fragment van pentaan-3-on.

In figuur 10.52 zie je dus het massaspectrum van pentaan-2-on.



10.52 Vereenvoudigd massaspectrum van pentaan-2-on of van pentaan-3-on



10.53 Een vloeistofchromatograaf gekoppeld aan een massaspectrometer: LC-MS

Kwantitatieve analyse

Bij massaspectrometrie is de piekhoogte recht evenredig met de hoeveelheid van het betreffende deeltje. Uit de verhouding van de pieken in een massaspectrum kun je de verhouding berekenen waarin bepaalde deeltjes in een mengsel aanwezig zijn. Massaspectrometrie meet de massa's van fragmenten en dus kun je ook isotopen in moleculen meten. U-238 isotopen hebben een grotere massa dan U-235 isotopen. Fragmenten met U-238 atomen hebben dus ook een grotere massa en met behulp van piekhoogten in een massaspectrum kun je de verhouding tussen U-238 en U-235 atomen berekenen. Deze isotopen zijn beide niet stabiel en vervallen na verloop van tijd. De vervaltijd is niet voor beide gelijk. Uit onder andere die verhouding is de ouderdom van de aarde bepaald.

In voorbeeld 3 zie je hoe je de hoeveelheid van verschillende zirkoniumisotopen in een mengsel uit de piekhoogte afleidt.

Omdat er vaak een mengsel moet worden onderzocht, kan de massaspectrometer worden gekoppeld aan een krachtige scheidingsmethode zoals vloeistofchromatografie. De combinatie van deze technieken heet LC-MS, zie figuur 10.53. De combinatie van gaschromatografie en massaspectrometrie heet GC-MS.



10.54 In poedervorm zorgt zirkonium voor de witte staarten in vuurwerk.

Voorbeeld 3

Hoe kun je met behulp van massaspectroscopie de samenstelling van een mengsel van zirkoniumisotopen bepalen?

Het metaal zirkonium wordt gebruikt voor sieraden zoals trouwringen, maar ook door tandtechnici voor bruggen en kronen. Van zirkonium bestaat een aantal isotopen. Vier isotopen zijn stabiel, dit zijn de isotopen met de massa's 90 u, 91 u, 92 u en 94 u en er is ook een radioactieve isotoop met een massa van 96 u en een zeer lange halveringstijd.

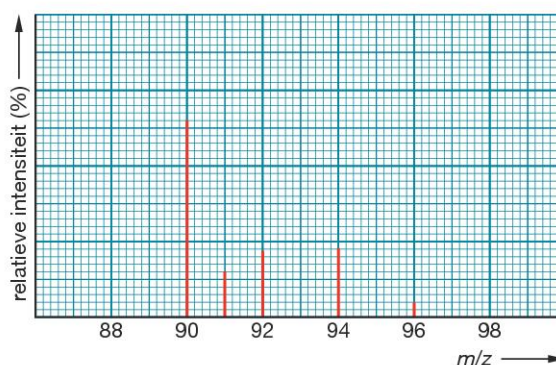
Zirkonium komt niet vrij in de natuur voor, maar wordt uit zirkoonsilicaat gewonnen. Bij dit proces ontstaat een mengsel van verschillende isotopen. Met massaspectroscopie kun je de samenstelling van dit mengsel bepalen.

In figuur 10.55b zie je een deel van het massaspectrum van het mengsel.

In tabel 10.55a staat de relatieve intensiteit van de pieken. De relatieve intensiteit geeft de verhouding aan waarin de verschillende isotopen in het mengsel aanwezig zijn. Dit isotopenmengsel bestaat dus uit 51,5% Zr-90, 11,2% Zr-91, 17,1% Zr-92, 17,4% Zr-94 en 2,8% Zr-96.

isotoop	relatieve intensiteit (%)
zirkonium-90	51,5
zirkonium-91	11,2
zirkonium-92	17,1
zirkonium-94	17,4
zirkonium-96	2,8

10.55a Resultaat metingen

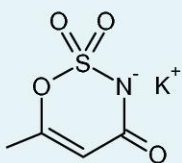


10.55b Relevant deel van het massaspectrum van een isotopenmengsel van zirkonium

Zoetstof verraadt zwembadplassers

Aan de concentratie van synthetische zoetstoffen in zwembadwater kun je het urinegehalte aflezen. Onderzoekers van de universiteit van Alberta, die dit recent publiceerden, speurden in zwembadwater naar E950 oftewel acesulfaam-K (ACE). Deze zoetstof geldt als een extreem stabiele vorm van milieuvervuiling: mensen breken hem niet af, bacteriën ook niet, en hij is ook nog goed bestand tegen zuren, basen en hoge temperaturen. Bovendien lozen mensen hem via de urine en niet via de darmen.

Hieronder zie je de structuur van het kaliumzout van ACE.



De stof is door de Canadese onderzoekers aangetoond met een combinatie van vloeistofchromatografie en massaspectrometrie: HPLC-MS.

De hoeveelheid ACE in urine hangt af van je dieet, maar in zwembaden vind je een doorsnede van de mensheid, dus kun je werken met een gemiddelde.

De Canadezen hebben een aantal urinemonsters geanalyseerd en kwamen uit op 2360 ng/mL (ng = nanogram). In China is ooit 4070 ng/mL gemeten, zodat in elk geval de orde van grootte lijkt te kloppen.

Bemonstering van 21 publieke zwembaden, één privézwembad en acht hottubs, en vergelijking met het plaatselijke kraanwater, leerde dat zwemmers de ACE-concentratie in zo'n bad kunnen verhogen met een factor 500. Dat komt neer op ongeveer maximaal 1 liter urine op 10 000 liter water.

Onbekend is hoeveel mensen zich schuldig maken aan plassen in het zwembad; tijdens een onderzoek gaf ooit 19% van de ondervraagden aan het ooit wel eens gedaan te hebben. Het is de vraag of de rest van de respondenten wel eerlijk was.

Bron: C2W



10.56 Plas liever in de zee dan in het zwembad.

● Opdracht C34

Samenvatting

- Met een massaspectrometer meet je de massa van deeltjes.
- In een massaspectrometer ontstaan door fragmentatie talloze kleinere geladen brokstukken van moleculen. Er treedt een scheiding op naar massa gedeeld door lading: m/z .
- Bij fragmentatie van moleculen ontstaan positieve ionen en radicalen. Een radicaal is een deeltje met een ongepaard elektron.
- Een massaspectrum geeft op de x-as de m/z van de fragmenten weer en op de y-as de relatieve intensiteit van de fragmenten.
- De structuur van moleculen kun je afleiden uit een massaspectrum.
- Uit de piekhoogtes in een massaspectrum kun je de verhoudingen tussen de hoeveelheden van de verschillende deeltjes bepalen.

Opdrachten

A 29

Vertel in stappen wat er met deeltjes gebeurt als ze in een massaspectrometer komen en uiteindelijk worden gedetecteerd.

A 30

a Wat is een radicaal?

Radicalen komen niet in een massaspectrum voor.

b Hoe kun je dat afleiden uit het gegeven langs de x-as?

B 31

De stof glycol (ethaan-1,2-diol) wordt als antivriesmiddel gebruikt in onder andere radiatoren van auto's en in hydraulische remvloeistof.

Een massaspectrum kan uitsluitsel geven of een stof ethaan-1,2-diol is. Hierbij moeten dan een aantal kenmerkende pieken van ethaan-1,2-diol zijn te zien.

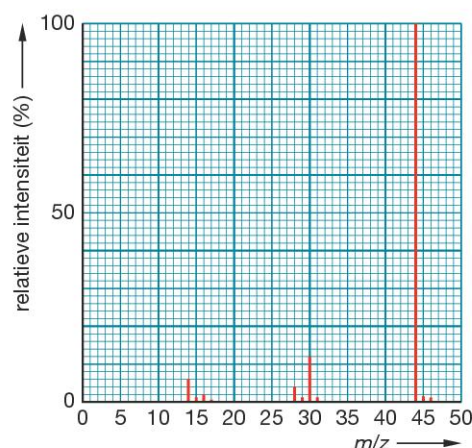
a Geef de waarde van m/z van het molecuulion.

b Geef de structuurformule van het fragment bij de piek $m/z = 31$.

c Dezelfde vraag voor het fragment bij de piek $m/z = 45$.

B 32 N_2O ☉

Eén van de stoffen die bijdragen aan het broeikaseffect is distikstofmono-oxide (N_2O). Het massaspectrum van distikstofmono-oxide staat in figuur 10.57.



10.57 Massaspectrum van N_2O

De piek bij $m/z = 30$ en de veel kleinere piek bij $m/z = 31$ worden beide veroorzaakt door ionen NO^+ . Er bestaan

verschillende soorten ionen NO^+ . Dit komt doordat er zowel van zuurstof als van stikstof in de natuur meer dan één isotoop voorkomt. Met behulp van Binas tabel 25 kun je nagaan welke ionsoorten NO^+ het piekje bij $m/z = 31$ veroorzaken.

a Geef van alle ionsoorten NO^+ , die het piekje bij $m/z = 31$ veroorzaken, aan welke combinatie van zuurstof- en stikstofisotopen erin aanwezig is.

Een molecuul distikstofmono-oxide is lineair. Voor de volgorde van de drie atomen in een molecuul distikstofmono-oxide kun je twee mogelijkheden bedenken: NNO en NON .

b Leid met behulp van het massaspectrum in figuur 10.57 af welke van de twee genoemde mogelijkheden voor de volgorde van de atomen in een distikstofmono-oxide molecuul de juiste is.

Naar: CE vwo-1,2 2003-II

B 33

Lees de tekst in het kader 'Zoetstof verradt zwembadplasers' en beantwoord de volgende vragen.

a Leg uit welke van de twee ionen van ACE de onderzoekers waarschijnlijk hebben gemeten.

b Bereken de m/z van het intacte negatieve ion afgerond op nul decimalen.

c Bereken hoeveel milligram ACE er volgens de Canadese onderzoekers aanwezig is in een olympisch zwembad. Ga uit van gemiddeld zwembadwater en een olympisch zwembad van 50 meter lang, 25 m breed en 2 m diep.

C 34 **Marmeranalyse**

Marmer bestaat voor het grootste deel uit calciumcarbonaat. Hierin komen, naast de meest voorkomende isotopen C-12 en O-16, zeer kleine hoeveelheden van de isotopen C-13 en O-18 voor. De percentages C-13 en O-18 in marmer zijn afhankelijk van de plaats van herkomst en de periode waarin het marmer is ontstaan.

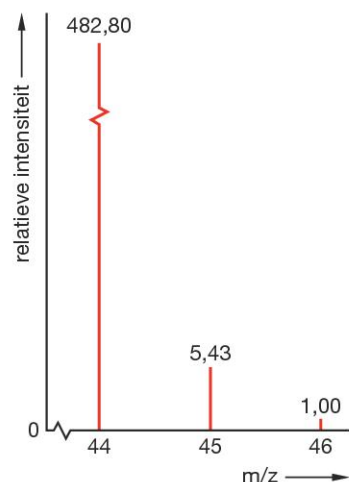
Van dit gegeven wordt gebruikgemaakt bij het onderzoek van marmeren voorwerpen uit de oudheid. Daarbij wordt een heel klein stukje van zo'n voorwerp fijngemalen. Het verkregen poeder wordt toegevoegd aan een overmaat van een sterk zuur in oplossing. Bij de reactie die dan optreedt, ontstaat onder andere koolstofdioxide.

a Geef de vergelijking van die reactie.

Doordat er verschillende isotopen van koolstof en zuurstof in het marmer voorkomen hebben niet alle koolstofdioxidemoleculen dezelfde molecuulmassa. Er komen vrijwel uitsluitend koolstofdioxidemoleculen voor met molecuulmassa's van 44 u, 45 u en 46 u.

- b** Geef van elk van deze soorten koolstofdioxidemoleculen aan uit welke van de bovengenoemde isotopen ze bestaan. Noteer je antwoord als volgt:
- isotopen in CO_2 -moleculen met massa 44 u: ...
 isotopen in CO_2 -moleculen met massa 45 u: ...
 isotopen in CO_2 -moleculen met massa 46 u: ...

In figuur 10.58 zie je het relevante deel van het massaspectrum van de marmeranalyse. Boven elke piek staat de relatieve verhouding gegeven, waarin de CO_2 -moleculen in het gemeten monster voorkomen.



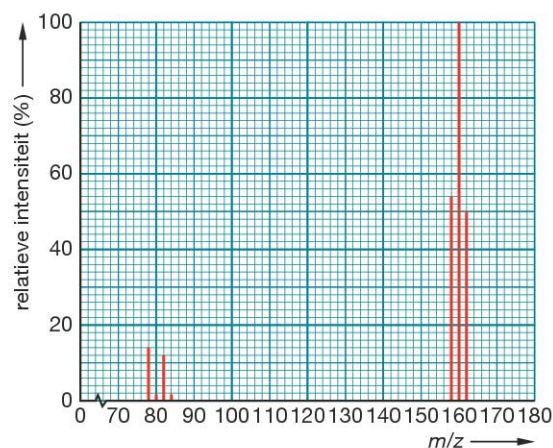
10.58 Gedeelte uit het massaspectrum van de marmeranalyse

- c** Bereken het massapercentage C-13 in het onderzochte marmer. Neem daarbij aan dat dit percentage gelijk is aan het massapercentage C-13 in het gevormde koolstofdioxidegas.

C 35 Broom

Het water van de Dode Zee bevat veel opgeloste zouten, waaronder bromiden. Door dit water onder invloed van de zon gedeeltelijk te laten verdampen wordt de bromideconcentratie groter en uiteindelijk hoog genoeg om broom te produceren.

Het gevormde broom bestaat uit de isotopen Br-79 en Br-81. Het wordt wel 'natuurlijk' broom genoemd. Het massaspectrum van natuurlijk broom is in figuur 10.59 afgebeeld.



10.59 Massaspectrum van natuurlijk broom

Natuurlijk broom dat op bovenstaande wijze is bereid, is altijd verontreinigd met wat waterstofbromide.

- a** Leg uit hoe uit het massaspectrum blijkt dat natuurlijk broom is verontreinigd met waterstofbromide.

In een laboratorium wil men 50 mg $^{81}\text{Br}_2$ bereiden. $^{81}\text{Br}_2$ is broom waarvan de moleculen uitsluitend de isotoop Br-81 bevatten. Men gaat daarbij uit van K^{81}Br , kaliumbromide met uitsluitend de isotoop Br-81.

- b** Bereken hoeveel mg K^{81}Br minimaal nodig is om 50 mg $^{81}\text{Br}_2$ te verkrijgen.

Een leverancier van K^{81}Br beweert dat van al het bromide dat in zijn kaliumbromide aanwezig is, minstens 99,0% Br-81 is en dus dat Br-79 voor 1,0% of minder aanwezig is. Om dit te controleren wordt met een zeer kleine hoeveelheid van het gevormde broom een massaspectrum opgenomen. De hoogte van de piek bij $m/z = 162$ wordt vergeleken met de hoogte van de piek bij $m/z = 160$. De verhouding tussen deze piekhoogten blijkt 100,0 : 4,1 te zijn. De hoogte van de piek die bij $m/z = 158$ ligt, is zo gering dat hij door de massaspectrometer niet meer wordt gemeten.

- c** Ga na of de bewering van de leverancier klopt dat het gehalte Br-81 in het geleverde kaliumbromide minstens 99,0% is.

Naar: CE wvo 2008-I

Je kunt nu

- uitleggen hoe een massaspectrometer werkt;
- massaspectra gebruiken bij structuurbepalingen;
- massaspectra gebruiken bij bepaling van een hoeveelheid of een isotopenverhouding.

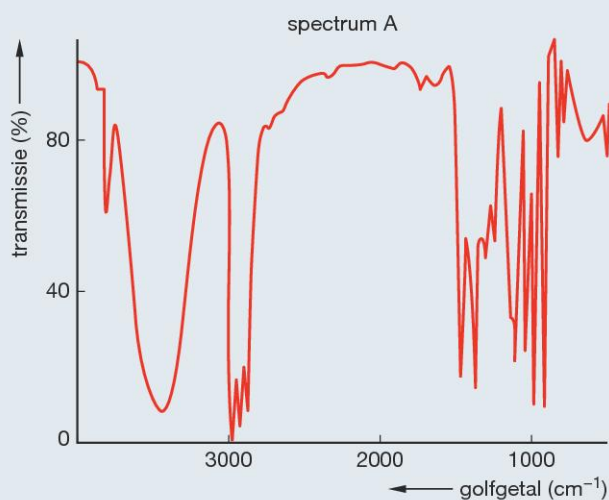
Afsluiting

Oefenopdrachten

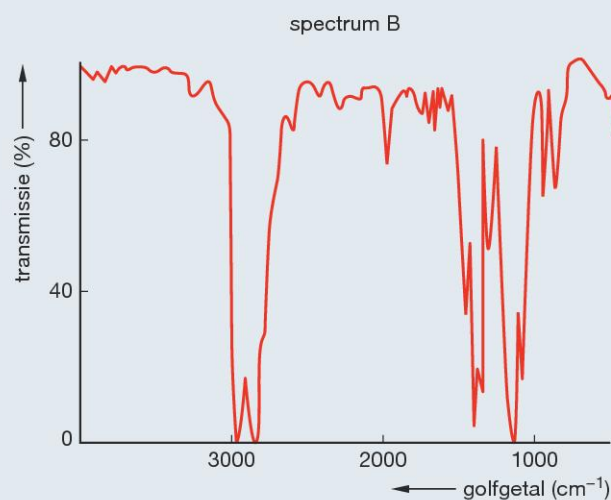


1

Ivor maakt van butaan-2-ol en van ethoxyethaan een infraroodspectrum. Na een koffiepauze komt hij erachter dat hij is vergeten te noteren welk spectrum bij welke stof hoort. De twee spectra zie je in figuur 10.60a en b.



10.60a



10.60b

In beide spectra komen rond de $3000 - 2800 \text{ cm}^{-1}$ meerdere banden voor.

a Welke bindingsvibratie zorgt in beide spectra voor deze banden?

b Leg uit welk spectrum bij welke stof hoort.



2

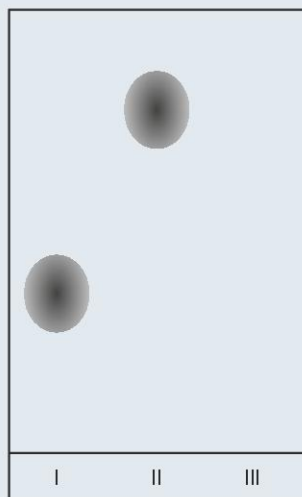
Thomas krijgt een groene kleurstof om te analyseren. Hij vermoedt dat het gaat om een mengsel van twee kleurstoffen, A en B, die hij in zijn voorraad heeft staan. Kleurstof A kleurt in het water blauw en hecht matig aan filtreerpapier. Stof B kleurt in het water geel en hecht beter aan filtreerpapier dan stof A.

Thomas wil papierchromatografie gebruiken om te controleren of zijn vermoeden over de groene stof correct is. In een handleiding vindt hij een geschikte loopvloeistof.

Op de plaatsen I en II op de horizontale lijn brengt Thomas oplossingen van de twee bekende stoffen aan. Op plaats III een oplossing van de groene stof. Na afloop ziet hij dat hij bijna gelijk had. De twee stoffen A en B zitten in de groene kleurstof, maar er is ook nog een derde kleurstof. Deze hecht nog beter aan het papier dan stof A en B. In figuur 10.61 zie je een deel van het chromatogram na afloop van de proef.

a Leg uit op welke plaats stof A en op welke plaats stof B is opgebracht.

b Teken het chromatogram na en maak het af voor de groene kleurstof.



10.61

Frank wil hetzelfde mengsel als Thomas analyseren, maar dan met vloeistofchromatografie.

c Leg uitgebreid uit wat Frank moet injecteren en waarnemen om te bevestigen dat de groene kleurstof uit drie componenten bestaat, waaronder kleurstof A en B.

d Leg uit of Frank bij zijn experiment gebruik kan maken van een uv/VIS-spectrofotometer als detector.



10.62 Smeer je in om je te beschermen tegen de schadelijke straling van de zon.

- 3** Om je huid tegen overmatige zonnestraling te beschermen zijn diverse typen zonnebrandcrèmes ontwikkeld (figuur 10.62). De meeste zonnebrandcrèmes bevatten stoffen die een groot deel van de ultraviolette straling (uv-straling) absorberen.

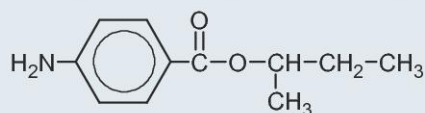
a Tussen welke golflengtes moeten de stoffen in zonnebrandcrème absorberen?

Een stof die uv-straling kan absorberen is 4-aminobenzeencarbonzuur. Deze stof is minder geschikt als component van een waterbestendige zonnebrandcrème.

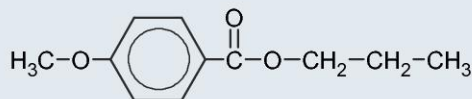
b Geef de structuurformule van 4-aminobenzeencarbonzuur.

c Waardoor is deze verbinding minder geschikt voor toepassing in waterbestendige zonnebrandcrèmes?

Van twee stoffen die in zonnebrandcrèmes worden toegepast om uv-straling te absorberen, zijn hieronder de structuurformules gegeven:



stof 1

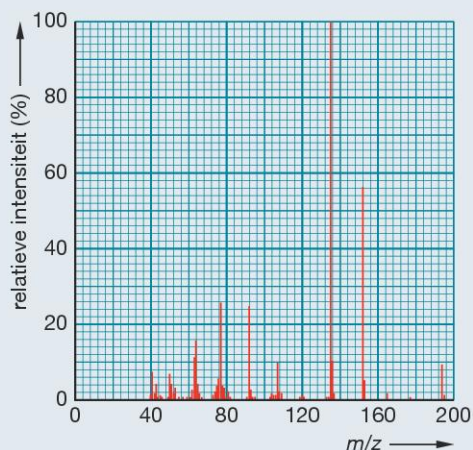


stof 2

Het verschil tussen de structuur van stof 1 en stof 2 kun je zien met ir- of met massaspectrometrie.

d Noem een verschil dat je zult aantreffen tussen het ir-spectrum van stof 1 en het ir-spectrum van stof 2. Licht je antwoord toe.

In figuur 10.63 zie je het massaspectrum van één van de twee stoffen.



10.63

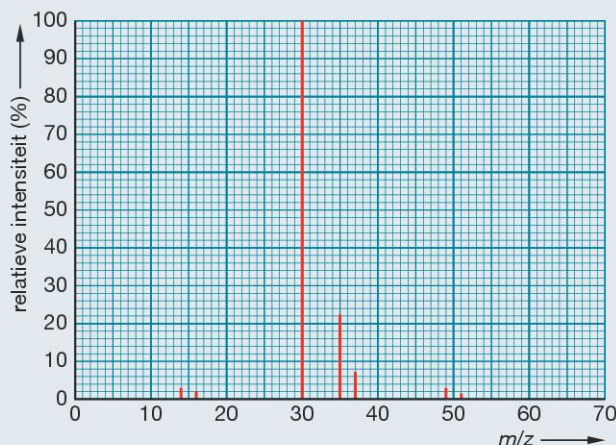
e Leg uit van welke van de twee stoffen dit het massaspectrum is. Ga ervan uit dat alle deeltjes in het massaspectrum lading 1+ hebben.

Tip: in een massaspectrometer gaat vaak een eventuele esterbinding als eerste stuk.

- 4** De formule van de stof nitrosylchloride wordt meestal geschreven als NOCl. Ervan uitgaande dat een nitrosylchloridemolecuul niet cyclisch is, zijn er in principe drie mogelijkheden voor de volgorde van de atomen in het molecuul: NOCl, ONCl of NClO.

Met behulp van het massaspectrum van nitrosylchloride (zie figuur 10.64) is na te gaan welke van deze drie mogelijkheden de juiste is.

Voor de ionen die zijn ontstaan uit moleculen nitrosylchloride hoef je uitsluitend rekening te houden met de isotopen N-14, O-16, Cl-35 en Cl-37.



10.64

- a** Geef de formule van de ionsoort die de piek bij $m/z = 30$ in het massaspectrum veroorzaakt.
- b** Leid met behulp van het massaspectrum af welke van de drie genoemde mogelijkheden voor de volgorde van de atomen in een nitrosylchloridemolecuul de juiste is.

Naar: CE vwo 1,2 2004-I



5

1,2,5,6,9,10-hexabroomcyclododecaan, verder in de opgave HBCD genoemd, is een veelgebruikte vlamvertrager. Van HBCD bestaan veel verschillende stereo-isomeren, zoals alfa-, bèta- en gamma-HBCD.

Als HBCD in oppervlaktewater terechtkomt, wordt de stof opgenomen door organismen zoals vissen en door visetende zoogdieren. Omdat HBCD sterk hydrofoob is, hoopt de stof zich op in het vetweefsel van deze dieren. Al bij een geringe vervuiling van water met HBCD ontstaat zo een veel hogere concentratie HBCD in de vetweefsels van zeezoogdieren. Recent is aangetoond dat het HBCD een schadelijk effect heeft op het immuunsysteem en de voortplanting van zeezoogdieren.

De HBCD-samenstelling, die door de industrie wordt gebruikt, bestaat voor ongeveer 12 massa-% uit alfa-HBCD, voor 8 massa-% uit bèta-HBCD en voor 78 massa-% uit gamma-HBCD. Deze samenstelling vind je ook terug in het oppervlaktewater. Zeer verrassend blijkt dat de HBCD-samenstelling in het vetweefsel van zeezoogdieren voor ongeveer 90 massa-% uit alfa-HBCD bestaat en voor de rest uit bèta-HBCD en gamma-HBCD.



10.65 Om te voorkomen dat meubels te snel branden kun je ze behandelen met een vlamvertrager.

Voor het relatief veel grotere aandeel van alfa-HBCD in zeezoogdieren in vergelijking met het aandeel alfa-HBCD in het oppervlaktewater kunnen verschillende hypothesen worden opgesteld. Hieronder staan twee van deze hypothesen.

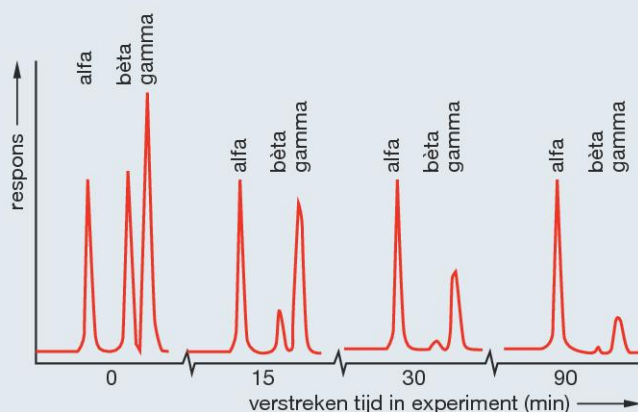
- 1 Het gamma-HBCD wordt in de lever van de zeezoogdieren via een isomerisatiereactie omgezet in alfa-HBCD.
- 2 Alfa-HBCD kan niet door de lever van de zeezoogdieren worden afgebroken en gamma-HBCD wel.

In een experiment werden geïsoleerde levercellen van proefdieren blootgesteld aan een oplossing van alfa-, bèta- en gamma-HBCD. Vervolgens werd op vier tijdstippen een monster genomen van het mengsel van de cellen en HBCD. Na het openbreken van de cellen werd met chromatografie bepaald wat de samenstelling van het mengsel van HBCD-isomeren is. Omdat de monsters vele stoffen bevatten, is door de onderzoekers voorafgaand aan het experiment een bepaling uitgevoerd met behulp van chromatografie.

Uit de resultaten hiervan konden zij afleiden welke piek in de chromatogrammen van de monsters overeenkomt met alfa-, bèta- of gamma-HBCD.

- a** Leg uit welk experiment met behulp van chromatografie de onderzoekers hebben uitgevoerd. Geef aan welk resultaat of welke resultaten ze hebben gebruikt om vast te stellen welke piek afkomstig is van alfa-, bèta- of gamma-HBCD in de chromatogrammen van de monsters.

In figuur 10.66 zijn de chromatogrammen van de vier monsters uit het experiment in één figuur weergegeven. Op de y-as staat de respons van de detector. Dit is hier een maat voor de hoeveelheid van de betreffende stof.

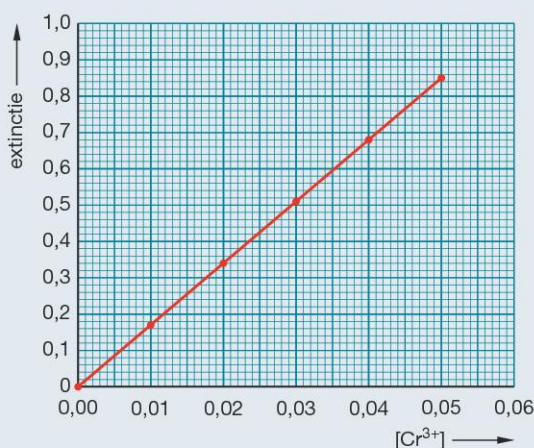


10.66

- b** Leg voor beide hypothesen uit of de hypothese in overeenstemming is met de resultaten van deze experimenten.

Naar: CE vwo 2015-I

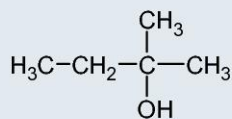
- 6** Jeroen wil van chroomerts het chroomgehalte bepalen. Hij vermaalt het erts tot een fijn poeder. Hij weegt 1,897 g van het poeder af en lost dit op in 20 mL 8 M salpeterzuur. Na een kwartiertje verwarmen brengt hij de heldere oplossing over in een maatkolf en vult haar aan tot 100,0 mL. Dit is de monsteroplossing. Jeroen bereidt ook een standaardchroomoplossing. Hij maakt hiermee een verdunningsreeks en bepaalt van elk van de oplossingen de extinctie. Het resultaat van zijn metingen zie je in figuur 10.67.



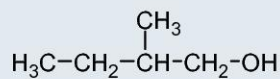
10.67

Jeroen bepaalt daarna de extinctie van de monsteroplossing. Die is 0,6476. Bereken het massapercentage chroom in de chroomerts.

- 7 Q en R zijn de koolwaterstoffen die ontstaan door de additie van water aan 2-methylbut-1-een. Deze koolwaterstoffen kunnen van elkaar worden gescheiden via destillatie. Er ontstaan zo twee fracties; een met Q en een met R.



Q



R

Twee leerlingen bespreken met elkaar de mogelijkheid om met behulp van een ir-spectrometer na te gaan welke structuurformule bij welke fractie hoort.

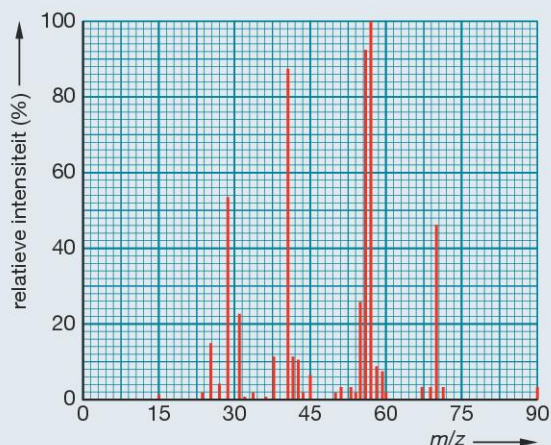
Mirjam beweert dat je met behulp van een ir-spectrometer kunt nagaan welke structuurformule bij welke fractie hoort. Elsje is daar niet zo zeker van. Zij denkt dat een onderzoek met een ir-spectrometer weleens geen uitsluitsel zal kunnen geven.

- a** Leg uit of je het eens bent met Mirjam of met Elsje.

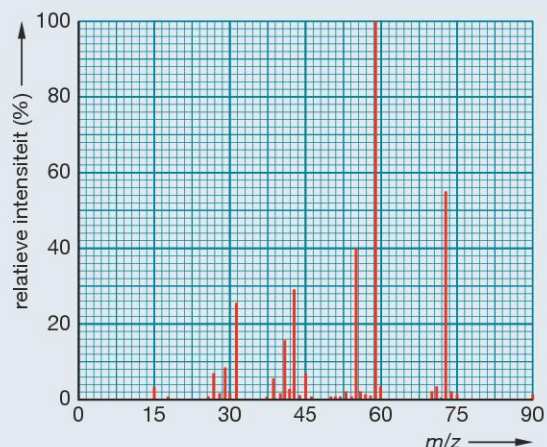
Door van beide fracties het massaspectrum op te nemen, kun je nagaan welke structuurformule bij welke fractie hoort.

Kenmerkend bij massaspectrometrie van alcoholen is dat daarbij onder andere zogenoemde α -cleavage plaatsvindt. Bij α -cleavage wordt een C-C-binding verbroken. Eén van de C atomen van deze C-C-binding is het C-atoom waaraan de OH-groep is gebonden. Het fragment dat het O-atoom bevat, krijgt hierbij de positieve lading. De intensiteiten van de pieken die bij deze fragmenten horen, is relatief hoog (20% of hoger). In figuur 10.68a en b zijn de massaspectra van beide fracties afgebeeld.

Met behulp van de informatie over α -cleavage kun je nagaan welke structuurformule bij welke fractie hoort.



10.68a



10.68b

- b** Geef de structuurformules van de positieve ionen die ontstaan bij α -cleavage van de molecuulionen van Q en R. Noteer je antwoord als volgt:
 α -cleavage van het molecuulion van Q geeft: ...
 α -cleavage van het molecuulion van R geeft: ...
- c** Leg uit welke structuurformule, Q of R, hoort bij het massaspectrum uit figuur 10.68a. Verwerk in je antwoord gegevens uit beide spectra.

Naar: CE vwo1,2 2007-II



8

Er zijn verschillende manieren om de ouderdom van gesteenten te bepalen. Eén daarvan is de kalium-argonmethode (^{40}K – ^{40}Ar -methode). Deze methode is gebaseerd op de veronderstelling dat vloeibare gesteenten geen argon kunnen bevatten. Men gaat hiervan uit omdat argon behoort tot de edelgassen die zich chemisch niet laten binden. Bovendien kan argon gemakkelijk uit een gesmolten massa ontsnappen omdat het een gas is. Om deze redenen veronderstelt men dat alle ^{40}Ar dat in een gesteente aanwezig is, pas na het stollen van dat gesteente is gevormd. Deze vorming is een trage kernreactie van ^{40}K -atomen, die zich van nature in gesteenten bevinden. Door de verhouding $^{40}\text{K} : ^{40}\text{Ar}$ te bepalen kun je de ouderdom van een gesteente bepalen. De uitkomst van de berekeningen met deze methode zijn onder andere van belang geweest om de ouderdom van de aardkorst te bepalen. Van een bepaalde steen wordt een massaspectrum opgenomen. De relatieve intensiteiten van de ^{40}K - en de ^{40}Ar -piek wordt bepaald uit het massaspectrum. De resultaten zijn ^{40}K : 0,443 en ^{40}Ar : 0,341.



10.69 Een olivijnkristal

a Bereken hoe oud de steen is. Gebruik behalve de meetresultaten ook onderstaande gegevens:

- 11% van de keren dat een ^{40}K -atoom verval, ontstaat een ^{40}Ar -atoom.
- De halfwaardetijd van ^{40}K is 1,28 miljard jaar. Dat wil zeggen dat er na 1,28 miljard jaar nog maar de helft van het aantal ^{40}K -atomen over is.

Tip: ga uit van duizend ^{40}K -atomen in het begin en stel dat daarvan x atomen worden omgezet.

Bij gesteenten die voor een gedeelte uit olivijn bestaan wordt soms een onjuiste ouderdom bepaald. Dit wordt veroorzaakt doordat tijdens het stollen van olivijn al een hoeveelheid ^{40}Ar in de olivijnkristallen werd ingesloten.

b Beredeneer of ten gevolge van het insluiten van ^{40}Ar tijdens het stollen de ouderdom van het gesteente als ouder of als jonger dan de werkelijke ouderdom wordt bepaald.

Keuzeopdrachten

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

1

Forensische chemie

Als je zo nu en dan met plezier naar CSI kijkt, is dit beslist een opdracht voor jou. Je verdiept je in de onderzoeksmethoden die worden toegepast op de sporen, gevonden op een plaats delict (pd).

2

Pijnstillers

Je leert meer over pijnstillers en hoe je door middel van dunnelaagchromatografie de samenstelling ervan kunt bepalen.

3

NMR, hoe zit dat precies? En MRI?

Voor wie meer wil weten over de analysetechniek NMR en de medische toepassing MRI.

4

Een echte puzzel

Je hebt in dit hoofdstuk al een beetje gepuzzeld. Als je nu een echte uitdaging wilt, is dit iets voor jou.

Overzicht begrippen

Analyse	Bij kwalitatieve analyse identificeer je stoffen; bij kwantitatieve analyse bepaal je hoeveelheden of concentraties.
Chromatografie	Chromatografie is een scheidingsmethode op basis van oplosbaarheid en aanhechtingsvermogen. Er is altijd sprake van een mobiele fase die langs of door een stationaire fase gaat. Als de mobiele fase een vloeistof is, spreek je van vloeistofchromatografie , bij een gas spreek je van gaschromatografie . Bij papierchromatografie is de mobiele fase een vloeistof (de loopvloeistof) en de stationaire fase papier of, bij TLC , silica op een vaste drager.
Chromatogram	Het resultaat van chromatografie heet een chromatogram. Bij het chromatogram van kolomchromatografie kun je daarin de retentietijd van stoffen aflezen. Dat is de tijd die de stof in de kolom heeft doorgebracht: de tijd vanaf injectie tot hij langs de detector is gekomen.
Elektromagnetische straling	Voorbeelden van elektromagnetische straling zijn röntgen, uv, licht en infrarood.
Golflengte	De golflengte is de afstand tussen twee gelijke punten van een golf, zoals de toppen.
Ijklijn	Een ijklijn is het resultaat van de meting van een ijkreeks . Dit zijn een aantal oplossingen met een bekende en oplopende concentratie: de standaardoplossingen .
Massaspectrometrie	Massaspectrometrie is een analytische techniek om massa's van deeltjes te meten. In een massaspectrometer krijgen de deeltjes een lading; daarbij kunnen ze in stukken breken. Het resultaat van massaspectrometrie heet een massaspectrum .
Monster en blanco	Het monster is het mengsel dat je gaat meten. Je meet ook op dezelfde wijze de blanco. Dit is een mengsel dat qua samenstelling gelijk is aan het monster, alleen de te meten stof ontbreekt.
Radicaal	Een radicaal is een deeltje met een oneven aantal elektronen waardoor er een ongepaard elektron voorkomt op een van de atomen.
Rf-waarde	Bij papierchromatografie en TLC geldt: $R_f = \frac{\text{afstand van startlijn tot middelpunt van een vlek}}{\text{afstand van startlijn tot vloeistoffront}}$
Spectrofotometrie	Bij spectrofotometrie meet je met een spectrofotometer stoffen met behulp van infraroodstraling (ir) en ultraviolette straling en licht (uv/VIS).
Spectroscopie	Bij spectroscopie meet je aan stoffen met behulp van elektromagnetische straling.
Spectrum	In een spectrum zie je de golflengtes die een bepaalde soort elektromagnetische straling bevat. In een absorptiespectrum zie je alle golflengtes die zijn opgenomen door een stof. In een emissiespectrum zie je alle golflengtes die zijn uitgezonden door een stof.

11 Redoxreacties

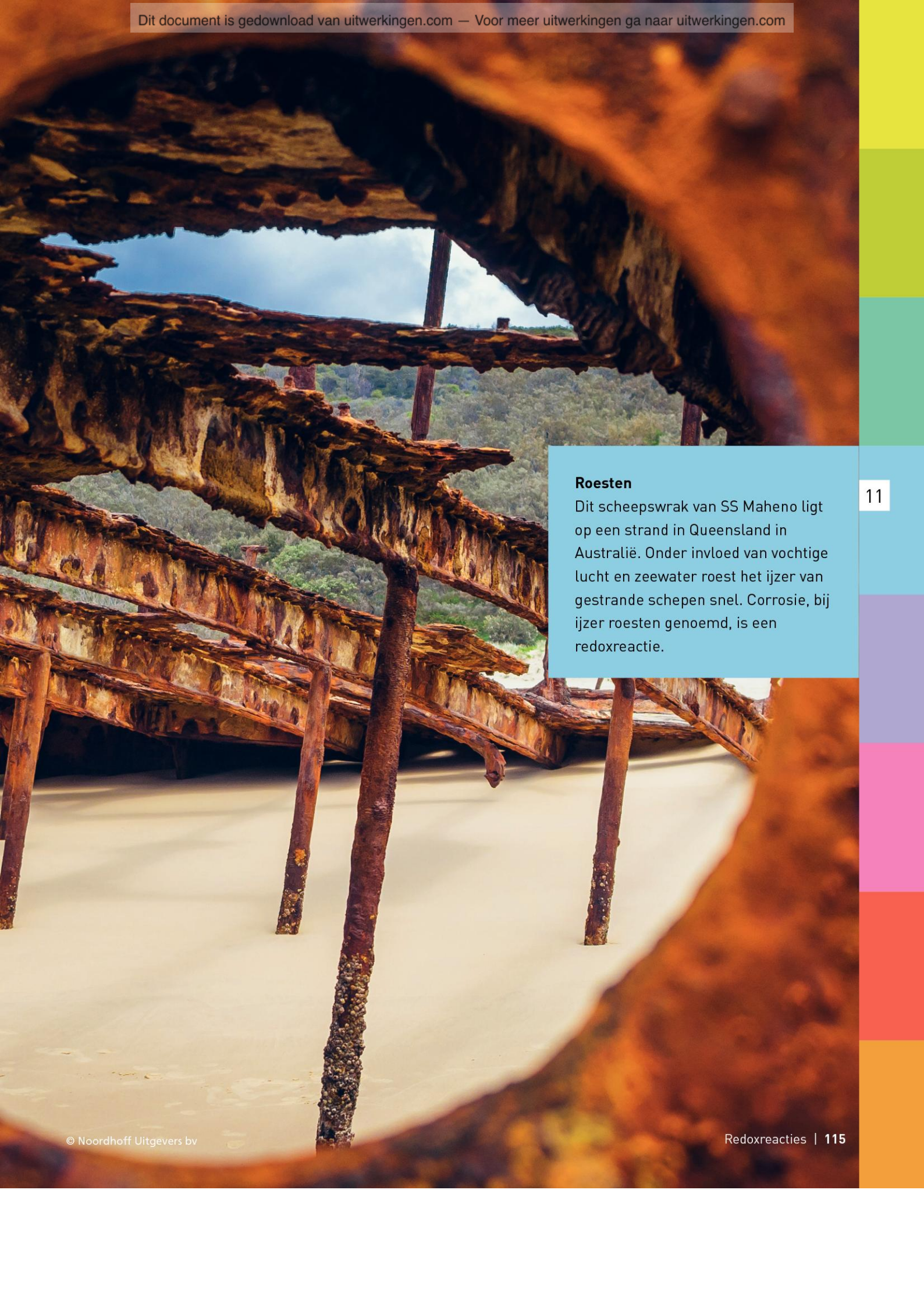
Inhoud

- 11.1** Elektronenoverdracht
Experimenten:
 - 11.1 Metalen in zoutzuur
 - 11.2 Redoxreacties van metalen
- 11.2** Redoxkoppels
Experiment:
 - 11.3 Halogenen en redoxreacties
- 11.3** Redoxreacties in oplossing
Experimenten:
 - 11.4 Het permanganaation
 - 11.5 Redoxreacties
 - 11.6 Chemische drol
 - 11.7 Dansend natrium
- 11.4** Toepassingen
Experimenten:
 - 11.8 De halfreactie van het jodaation
 - 11.9 Alcoholen als reductor
 - 11.10 Bepaling molariteit van ijzer(II)oplossing
 - 11.11 Bepaling sulfietgehalte in witte wijn
 - 11.12 Bepaling vitamine C-gehalte in tabletten

Afsluiting

Overzicht begrippen





Roesten

Dit scheepswrak van SS Maheno ligt op een strand in Queensland in Australië. Onder invloed van vochtige lucht en zeewater roest het ijzer van gestrande schepen snel. Corrosie, bij ijzer roesten genoemd, is een redoxreactie.

11

Bliksem

Iedereen kent wel het verschijnsel van de bliksem bij onweersbuien. Bliksem wordt veroorzaakt door een groot spanningsverschil tussen de wolken en het aardoppervlak. Via een complex systeem van ontladingen vindt er uiteindelijk een grote overdracht van elektronen plaats tussen de wolken en het aardoppervlak.

**Je leert**

- dat in reacties stoffen elektronen kunnen opnemen en elektronen kunnen afstaan;
- redoxreacties herkennen;
- hoe je een redoxreactie kunt opstellen met behulp van halfreacties.

11.1 Elektronenoverdracht



voor de reactie



na enige tijd

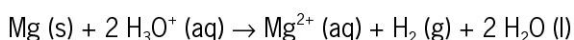
11.1 Zelfs een zeer edel metaal zoals goud reageert met koningswater, een mengsel van salpeterzuur en zoutzuur.

Reacties van zure oplossingen met metalen

De bliksem op de openingsfoto ontstaat door overdracht van elektronen vanuit de negatief geladen onderkant van de onweerswolk naar het positief geladen aardoppervlak. In de scheikunde zijn er veel processen waarbij tijdens de reactie ook sprake is van een elektronenoverdracht.

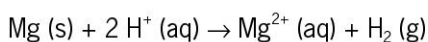
Een metaal kan reageren met een zure oplossing, zoals je in experiment 11.1 kunt zien (figuur 11.1). Maar wat gebeurt er tijdens zo'n reactie?

Als bijvoorbeeld het metaal magnesium reageert met de H_3O^+ -ionen van een zure oplossing ontstaan magnesiumionen, die in oplossing gaan. Daarnaast worden de H_3O^+ -ionen omgezet in water en waterstofgas. Je ziet de oplossing bruisen.

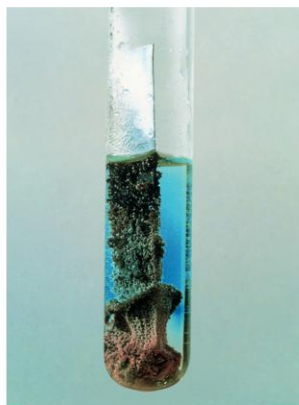


In deze reactievergelijking worden Mg-atomen omgezet in Mg^{2+} -ionen, de magnesiumatomen hebben dus twee elektronen afgestaan. De H_3O^+ -ionen nemen deze elektronen op en worden omgezet in waterstofgas en water. Er vindt dus een elektronenoverdracht plaats. Een reactie waarbij elektronenoverdracht plaatsvindt, noem je een **redoxreactie**. De reactie van magnesium met een zuur is daar een voorbeeld van.

In het algemeen schrijf je bij redoxreacties geen H_3O^+ , maar H^+ omdat dit eenvoudiger is. De reactievergelijking wordt dan:



- Experiment 11.1
- Experiment 11.2



11.2 Een plaatje zink in een kopersulfaatoplossing. Er slaat vast koper neer op het zinkplaatje.

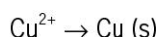
Redoxreacties

Een metaal kan ook reageren met een zoutoplossing, zoals je in experiment 11.2 kunt zien. Een kopersulfaatoplossing heeft een blauwe kleur door de Cu^{2+} -ionen. Als je aan deze kopersulfaatoplossing een stukje zink toevoegt, verdwijnt het zink. De blauwe kleur van de oplossing wordt lichter en er ontstaat koper, zie figuur 11.2. Het lichter worden van de kopersulfaatoplossing betekent dat de Cu^{2+} -concentratie kleiner wordt en het verdwijnen van het stukje zink betekent dat er iets met de zinkatomen gebeurt.

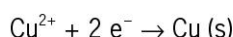
Blijkbaar reageren de Cu^{2+} -ionen met het zink. De zinkatomen staan elektronen af (donor) en vormen zinkionen, de koperionen nemen elektronen op (acceptor) en vormen koperatomen. Er vindt een elektronenoverdracht plaats, dit is dus een redoxreactie.

Het opstellen van een reactievergelijking voor redoxreacties is eenvoudiger als je deze opdeelt in stappen. Je kijkt daarbij eerst naar het deeltje dat de elektronen opneemt, in dit geval het Cu^{2+} -ion.

Je kunt voor het Cu^{2+} -ion de volgende vergelijking opstellen:



Je maakt de ladingsbalans van de reactie kloppend door elektronen toe te voegen. Daarvoor gebruik je het symbool e^- .



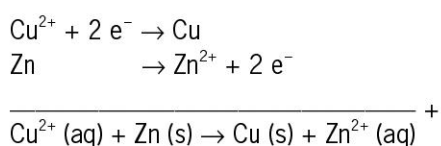
Deze vergelijking heet een **halfreactie**. Ze geeft de helft van de reactie weer. Het deeltje dat de elektronen opneemt noem je de **oxidator**. De oxidator in deze reactie is het Cu^{2+} -ion.

In de tweede stap kijk je naar het deeltje dat de elektronen afstaat. In deze reactie worden de elektronen afgestaan door de Zn-atomen:



De Zn-atomen staan elektronen af, je noemt het deeltje dat elektronen afstaat de **reductor**. De reductor in deze reactie is het Zn-atoom.

Als je deze twee halfreacties optelt, krijg je de vergelijking van de redoxreactie, de **totaalreactie** genoemd.

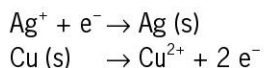


In een totaalreactie mogen geen elektronen meer voorkomen en staan alle toestandsaanduidingen erbij.

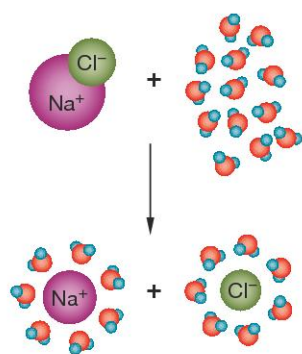
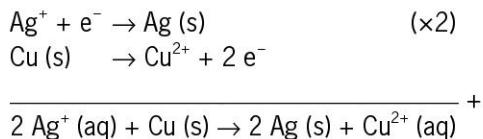


11.3 Een koperen plaatje in demineraal water links en een zilvernitraatoplossing rechts. Er ontstaat rechts een zilveren laagje op het koper.

Als je een koperen munt in een oplossing van zilvernitraat legt, ontstaat na verloop van tijd een laagje zilver op de munt, zie figuur 11.3. In deze redoxreactie reageren de Ag^+ -ionen met de Cu-atomen. De Ag^+ -ionen zijn de oxidator en de Cu-atomen zijn de reductor. De halfreacties zijn dan:



Omdat het Cu-atoom twee elektronen afstaat en een Ag^+ -ion er maar één opneemt, moet je de halfreactie van zilver met twee vermenigvuldigen om een kloppende reactievergelijking te krijgen, zodat in de totaalreactie geen elektronen meer staan.



11.4 Het oplossen van keukenzout is geen redoxreactie, de ladingen van de ionen veranderen niet.

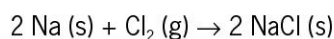
Het herkennen van redoxreacties

Om te bepalen of een reactie een redoxreactie is, kijk je of er sprake is van een elektronenoverdracht. Bij een elektronenoverdracht moeten er in de reacties deeltjes zijn die van lading veranderen. In het hiervoor besproken voorbeeld van Zn met Cu^{2+} -ionen is dit heel duidelijk. Een Cu^{2+} -ion neemt twee elektronen op en is na de pijl veranderd in een neutraal Cu-atoom. Het Zn-atoom staat twee elektronen af en is na de pijl veranderd in een opgelost Zn^{2+} -ion. Maar soms is het moeilijker te zien. Als je bijvoorbeeld de volgende vergelijking ziet, lijkt het om een redoxreactie te gaan:

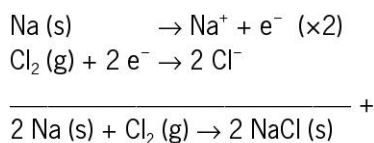


Voor de pijl staan geen ladingen, na de pijl wel. Je zou dus kunnen denken dat er elektronen worden overgedragen en dat er sprake is van een redoxreactie. Kijk je echter naar de ladingen van de deeltjes, dan zie je dat NaCl een zout is. NaCl bestaat uit een Na^+ -ion en een Cl^- -ion. Dus zijn er zowel voor als na de pijl Na^+ - en Cl^- -ionen. Het zout NaCl wordt gehydrateerd door watermoleculen en er vindt hier geen elektronenoverdracht plaats (figuur 11.4). Dit is een oplosvergelijking en geen redoxreactie.

Als je de onderstaande vergelijking bekijkt, lijkt er geen redoxreactie plaats te vinden omdat je voor en na de pijl geen ladingen ziet.



Maar er vindt nu wel een elektronenoverdracht plaats. Voor de pijl zijn Na en Cl_2 neutraal (figuur 11.5 en 11.6), na de pijl zijn er Na^+ - en Cl^- -ionen ontstaan. Die vormen het zout NaCl. Je kunt dit goed zien als je de halfreacties van deze reactie opschrijft.



Natrium staat dus elektronen af aan chloor en er ontstaat natriumchloride (figuur 11.7).



11.5 Natrium



11.6 Chloorgas

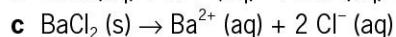
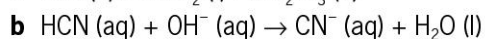
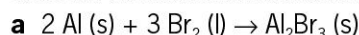


11.7 Uit het natrium en chloorgas ontstaat keukenzout.

Hieronder staan nog enkele voorbeelden.

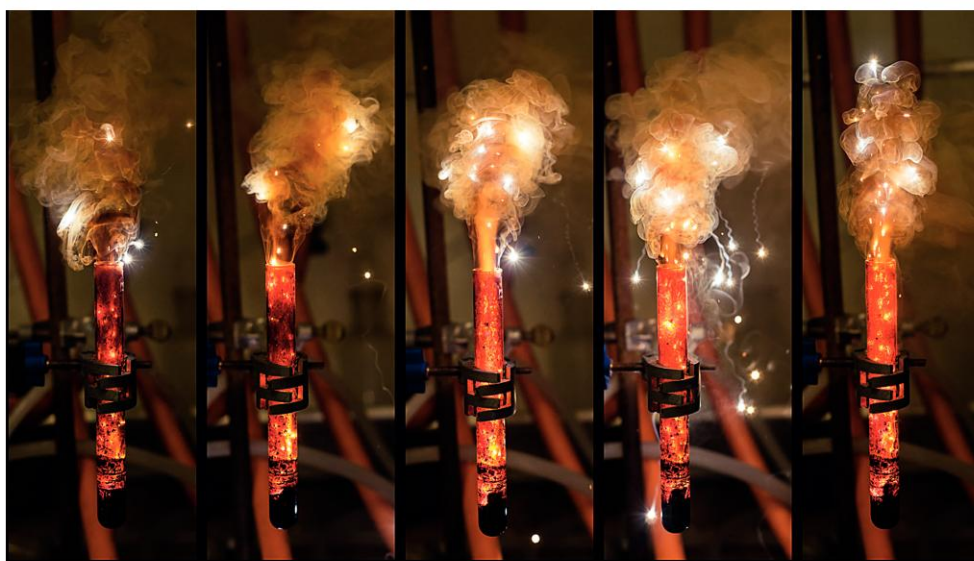
Voorbeeld

Geef van de onderstaande reacties aan of ze een redoxreactie zijn.



- a** Voor de pijl is het Al-atoom neutraal, na de pijl zijn er Al^{3+} -ionen. Ook Br_2 is voor de pijl neutraal, na de pijl zijn er Br^- -ionen. Er is hier sprake van een elektronenoverdracht van Al naar Br_2 , dus gaat het om een redoxreactie (figuur 11.8).
- b** Er is geen sprake van elektronenoverdracht. Dit is een zuur-basereactie, er wordt een H^+ -ion overgedragen van HCN naar OH^- .
- c** Voor en na de pijl zijn de ladingen van alle deeltjes gelijk. Dit is een oplosvergelijking.

11.8 De reactie van aluminium met broom is exotherm. Als er voldoende warmte is ontstaan, verloopt de reactie verder heftig met vuurverschijnselen.



Samenvatting

- Een redoxreactie is een reactie waarbij elektronenoverdracht plaatsvindt. De lading van de deeltjes voor en na de pijl in de reactievergelijking verandert. Bij redoxreacties schrijf je meestal H^+ in plaats van H_3O^+ .
- In een redoxreactie neemt een oxidator de elektronen op en een reductor staat de elektronen af.
- Een redoxreactie bestaat uit twee halfreacties, een van de reductor en een van de oxidator. In halfreacties komen behalve de reagerende deeltjes ook elektronen voor.
- Bij het opstellen van de totaalreactie van een redoxreactie tel je de halfreacties op en maak je het aantal elektronen dat wordt opgenomen door de oxidator gelijk aan het aantal elektronen dat wordt afgestaan door de reductor.

Bombardeerkever

Insecten worden vaak opgegeten door andere dieren. Om dit te voorkomen maken insecten gebruik van bijvoorbeeld camouflage of van afweerstoffen. Zo zag je in hoofdstuk 8 al dat mieren mierenzuur maken om zich te verdedigen. De bombardeerkever gebruikt een redoxreactie als afweermechanisme.

De bombardeerkever is een insect van maar 1 à 1,5 cm groot, maar hij heeft een zeer bijzonder afweermechanisme. Wanneer de bombardeerkever door een vijand wordt aangevallen, richt hij twee kleine buisjes in zijn achterlijf op zijn belager (figuur 11.9a). Er volgt een piepkleine explosie die klinkt als een schot. Een gloeiend hete, bijtende vloeistof schiet door de gasvorming naar buiten en veroorzaakt pijnlijke brandwonden.

De kever bezit klieren die hydrochinon en waterstofperoxide produceren. Deze stoffen worden gemengd tot een zeer geconcentreerde oplossing van 10 massa-% hydrochinon en 25 massa-% waterstofperoxide.

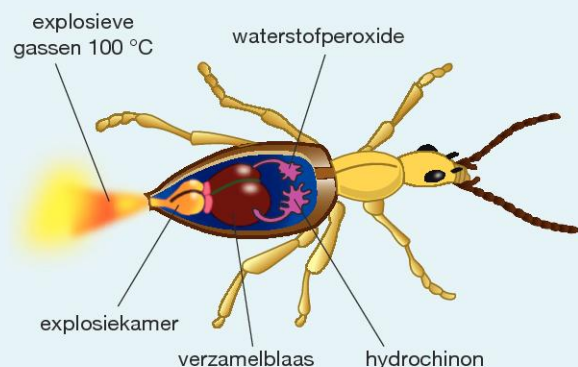


11.9a Chemicaliën spuitende bombardeerkever met de buisjes gericht op zijn aanvaller

Dit mengsel wordt in een verzamelblaas bewaard en bij gevaar via kleppen naar een zogenoemde explosiekamer geperst. Daar wordt een oplossing met enzymen aan het mengsel toegevoegd waarna direct de explosie volgt (figuur 11.9b).

Voorheen werd altijd gedacht dat de bombardeerkever in één keer alles naar buiten schiet, maar uit nieuw onderzoek is duidelijk geworden dat de reactieproducten in ultrasnelle pulsen naar buiten komen. Net zoals een machinegeweer. Vermoedelijk zorgt dit ervoor dat de kever niet oververhit raakt en energie kan besparen.

De kever is een evolutionair mysterie. Het valt namelijk niet logisch te verklaren dat het complexe verdedigingsmechanisme, met zijn reservoirs en reactieruimte en op het juiste moment openende kleppen, zich langs de geleidelijke weg van evolutie per toeval heeft ontwikkeld. Daarnaast is er ook verwondering over het feit dat de kever de chemische stoffen zo precies kan mengen zonder zelf te exploderen.



11.9b Schematische weergave van het afweermechanisme van de bombardeerkever

● Opdracht C9

Opdrachten

A 1

- a Wat is het kenmerk van een zuur-basereactie?
b Wat is het kenmerk van een redoxreactie?

A 2

Kies in onderstaande zinnen het juiste antwoord.

- a Een oxidator is een deeltje dat elektronen opneemt / afstaat.
b Een reductor is een deeltje dat elektronen opneemt / afstaat.
c In een halfreactie staan wel / geen elektronen.
d In een totaalreactie staan wel / geen elektronen.

B 3

Geef steeds voor iedere halfreactie aan of ze een halfreactie van een oxidator of van een reductor is.

- a $F_2(g) + 2e^- \rightarrow 2F^-(aq)$
b $ClO_3^-(aq) + 6H^+(aq) + 6e^- \rightarrow Cl^-(aq) + 3H_2O(l)$
c $Ni(s) \rightarrow Ni^{2+}(aq) + 2e^-$
d $Sn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn(s)$
e $Sn^{2+}(aq) \rightarrow Sn^{4+}(aq) + 2e^-$

B 4

Neem de onderstaande halfreacties over en maak ze kloppend.

- a $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe(s)$
b $I^- \rightarrow I_2(s) + e^-$
c $H_2O(l) + e^- \rightarrow H_2(g) + OH^-(aq)$
d $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq)$
e $NO_3^-(aq) + H^+(aq) \rightarrow NO(g) + 2H_2O(l)$

B 5

Tel de halfreacties op en geef de totaalreactie. Let op, in een totaalreactie mogen geen elektronen aanwezig zijn.

- a $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu(s)$ en $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
b $Br_2(l) + 2e^- \rightarrow 2Br^-(aq)$ en $Co \rightarrow Co^{3+} + 3e^-$
c $Al(s) \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ en $Hg^+ + e^- \rightarrow Hg(s)$

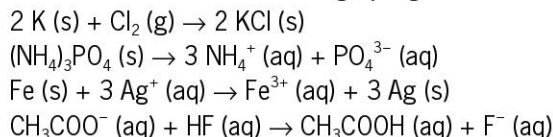
B 6

Bekijk de volgende drie totaalreacties. Stel voor iedere totaalreactie de twee halfreacties op. Geef ook aan welke halfreactie van de oxidator is en welke van de reductor is.

- a $Mg(s) + Ni^{2+}(aq) \rightarrow Mg^{2+}(aq) + Ni(s)$
b $2S_2O_3^{2-}(aq) + Cu^{2+}(aq) \rightarrow S_4O_6^{2-}(aq) + Cu(s)$
c $2Al(s) + 3Pb^{2+}(aq) \rightarrow 2Al^{3+}(aq) + 3Pb(s)$

B 7

Hieronder staan vier reactievergelijkingen.



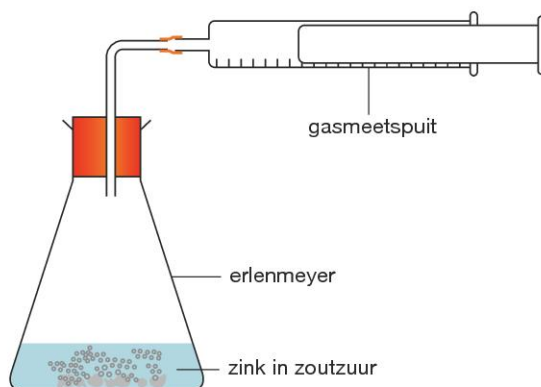
- a Welke van deze reacties zijn redoxreacties?
b Geef aan, als er sprake is van een redoxreactie, welk deeltje de oxidator en welk deeltje de reductor is.
c Leg uit voor het geval de reactie geen redoxreactie is, wat voor reactie het dan wel is.

C 8

Metalen die reageren met verdunde oplossingen van een zuur noem je onedel. Een voorbeeld van een onedel metaal is zink. Als je een stukje zink in zoutzuur doet, treedt er een reactie op waarbij waterstofgas ontstaat. Het waterstofgas dat ontstaat, kun je opvangen met een opstelling zoals is weergegeven in figuur 11.10.

- a Geef de vergelijking van deze reactie. Gebruik H^+ in plaats van H_3O^+ .
b Leg uit waarom er hier sprake is van een redoxreactie.

Hannah voert een proefje uit waarbij ze een stukje zink van 31 mg in een overmaat zoutzuur brengt. Ze vangt het waterstofgas op en leest af dat er 8,2 mL waterstofgas is ontstaan.



11.10 Met deze opstelling kun je de hoeveelheid gas bepalen die ontstaat bij de reactie tussen zink en zoutzuur.

Hannah vraagt zich af of ze al het gas heeft opgevangen.

- c Bereken hoeveel mL waterstofgas er in totaal kon ontstaan. Ga uit van $T = 298\text{ K}$ en standaarddruk.
- d Bereken hoeveel procent van het gas Hannah heeft opgevangen.

C 9

Lees de tekst in het kader 'Bombardeerkever' en beantwoord de volgende vragen.

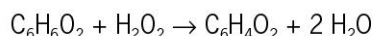
Hydrochinon lost goed op in een oplossing van waterstofperoxide dankzij de vorming van waterstofbruggen tussen de hydrochinonmoleculen, de waterstofperoxidemoleculen en de watermoleculen. De structuurformule van hydrochinon is hieronder weergegeven.



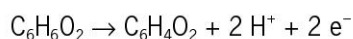
hydrochinon

- a Neem de structuurformule van hydrochinon over en teken hierbij de structuurformule van zowel een watermolecuul als een waterstofperoxidemolecuul. Geef met stippellijntjes aan hoe water en waterstofperoxide aan het hydrochinonmolecuul kunnen binden door middel van waterstofbruggen.

De explosie wordt veroorzaakt door exotherme reacties. Een van die reacties is die tussen hydrochinon en waterstofperoxide:



Dit is een redoxreactie. De halfreactie voor de omzetting van hydrochinon bij deze reactie is hieronder weergegeven:



- b Leg uit of waterstofperoxide in deze halfreactie de oxidator of de reductor is.
- c Teken het energiediagram van de reactie van hydrochinon met waterstofperoxide. Teken alle niveaus met bijschriften.
- d Leg uit aan de hand van het energiediagram en gegevens uit het contextkader dat de reactie niet plaatsvindt in de verzamelblaas, maar wel in de explosiekamer.

De vloeistof in de verzamelblaas bevat meer waterstofperoxide dan nodig is voor de reactie met hydrochinon.

- e Beredeneer dit onder andere aan de hand van de reactie van hydrochinon met waterstofperoxide en van getalsgegevens uit het contextkader.

Naar: CE havo 2015-I

C 10 ★

De reactie van ijzer met zoutzuur is een redoxreactie. Er ontstaat waterstofgas en een oplossing van ijzer(II)chloride.

- a Geef de vergelijking van de totaalreactie die verloopt.
- b Geef de beide halfreacties van deze reactie.
- c Bereken hoeveel gram ijzer maximaal kan reageren met 20,0 mL 0,100 M zoutzuur.

Experimenten

11.1 Metalen in zoutzuur

Je onderzoekt of metalen met zoutzuur reageren.

11.2 Redoxreacties van metalen

Je onderzoekt of metalen met zoutoplossingen reageren.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- de begrippen halfreactie, totaalreactie, oxidator en reductor uitleggen;
- bepalen of een reactie een redoxreactie is of niet.

Brons- en ijzertijd

Brons is een legering van koper en tin. Brons was eerder beschikbaar dan ijzer. Brons is het eerste metaalmengsel dat werd gebruikt voor het maken van wapens. Ijzer is echter wel weer gemakkelijker te bewerken. Toen de techniek voor het winnen van ijzer uit ijzererts bekend was, ging de bronstijd over in de ijzertijd. Hiernaast zie je een afbeelding van enkele bronzen en ijzeren wapens.

**Je leert**

- hoe je de metalen kunt rangschikken naar edelheid;
- hoe je kunt voorspellen of en op welke wijze redoxreacties verlopen;
- hoe je redoxreacties kunt opstellen aan de hand van halfreacties uit Binas tabel 48.

11.2 Redoxkoppels



11.11 Enkele armbanden van verschillende metalen



11.12 Lithium is een metaal dat zeer heftig met water reageert.

De edelheid van metalen

De techniek om tin- en koperionen uit ertsen om te zetten in tin- en koperatomen was eerder bekend dan de techniek om ijzerionen uit ijzererts om te zetten in ijzeratomen. Daardoor kwam de bronstijd voor de ijzertijd.

Een methode om koperionen om te zetten in koperatomen is via een reactie met het metaal zink zoals je in de vorige paragraaf zag. Zn^{2+} -ionen reageren echter niet met koper. Dat komt omdat koper een edeler metaal is dan zink. In de reactie verdwijnt het onedeler metaal zink en ontstaat het edeler metaal koper. Omgekeerd verloopt de reactie dus niet. In de vorige paragraaf werd ook uitgelegd dat Ag^+ -ionen reageren met koper. Het metaal koper verdwijnt dan en het metaal zilver ontstaat. Deze reactie verloopt omdat het metaal zilver edeler is dan het metaal koper.

Je kunt nu de drie metalen: koper, zink en zilver ordenen op toenemende edelheid. Zink is het minst edel, dan koper en dan zilver.

Edelheid van metalen kun je ook op een andere manier omschrijven. Alle metalen zijn reductoren, ze vormen positieve ionen en staan dus elektronen af. Een onedel metaal, een metaal dat gemakkelijk met andere stoffen reageert, is een sterke reductor. Een edel metaal, een metaal dat niet zo gemakkelijk reageert, is een zwakke reductor. Je kunt de drie metalen koper, zink en zilver dus ook ordenen naar afnemende reductorsterkte. Zink is de sterkste reductor, dan koper en dan zilver.

De positieve ionen van deze drie metalen zijn alle drie oxidatoren. De Ag^+ -ionen kunnen reageren met de metalen zink en koper. De Cu^{2+} -ionen kunnen alleen reageren met het metaal zink, de Zn^{2+} -ionen kunnen met geen van deze metalen reageren.



11.13a Van het redoxkoppel F_2/F^- is fluorgas een sterke oxidator. Het reageert zeer heftig met metalen zoals hier met cesium.



11.13b De zwakke geconjugeerde reductor van fluor, het fluoride F^- , is onderdeel van tandpasta.

Je kunt dus de metaalionen ordenen naar afnemende oxidatorsterkte: de Ag^+ -ionen zijn de sterkste oxidatoren, dan de Cu^{2+} -ionen en de Zn^{2+} -ionen zijn het zwakst.

Als het metaal een sterke reductor is, dan is het metaalion een zwakke oxidator.

Het Ag-atoom noem je de **geconjugeerde reductor** van de oxidator Ag^+ . Het Ag^+ -ion is dan weer de **geconjugeerde oxidator** van het Ag-atoom. Ag en Ag^+ zijn samen een **redoxkoppel**. In Binas tabel 48 staat een groot aantal redoxkoppels gerangschikt naar afnemende oxidatorsterkte. Je vindt de onedele metalen op de rechterbladzijde onderaan in de rechterkolom bij de sterkste reductoren. De edele metalen goud en zilver vind je op de linkerbladzijde ergens halverwege in de rechterkolom bij de zwakke reductoren. In Binas tabel 48 geldt dat een reductor sterker is, als hij lager in de rechterkolom staat.

Standaardelektrodepotentiaal

Achter elk redoxkoppel in Binas tabel 48 staat de zogenaamde **standaardelektrodepotentiaal**, V_0 , uitgedrukt in volt. V_0 is een maat voor de sterkte van de oxidator in het koppel. Hoe hoger de waarde van V_0 , hoe sterker de oxidator. Hoe lager de waarde van V_0 , hoe sterker de reductor. Dus sterke oxidatoren (figuur 11.13a) staan hoog in de linkerkolom van de tabel en sterke reductoren staan laag in de rechterkolom van de tabel. Om te bepalen of een redoxreactie verloopt kun je de volgende regels gebruiken.

Een redoxreactie is aflopend als het verschil in de standaardelektrodepotentiaal tussen de oxidator en de reductor groter is dan of gelijk is aan 0,3 V. Ligt het verschil tussen de 0,3 en -0,3 V, dan is er sprake van een evenwichtsreactie. Bij een verschil kleiner dan -0,3 V verloopt er geen reactie. Je kunt dit als volgt weergeven:

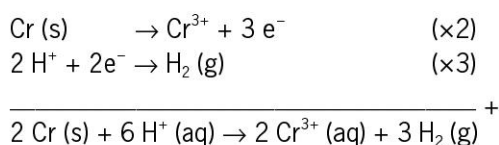
aflopende redoxreactie:	$\Delta V_0 = V_0(ox) - V_0(red) \geq 0,3 \text{ V}$
evenwichtsreactie:	$-0,3 \text{ V} < \Delta V_0 < 0,3 \text{ V}$
de reactie verloopt niet:	$\Delta V_0 \leq -0,3 \text{ V}$

Oxidator of reductor

Van metalen is bekend dat ze altijd als reductor reageren, terwijl halogenen altijd als oxidator reageren. Sommige deeltjes kunnen echter zowel oxidator als reductor zijn. Bekende voorbeelden van deeltjes die als oxidator of reductor kunnen reageren zijn Sn^{2+} , Fe^{2+} en H_2O . Zo vind je het Sn^{2+} -ion als reductor bij standaardelektrodepotentiaal +0,15 V en als oxidator bij -0,14 V. Hoe de deeltjes reageren, hangt af van de andere deeltjes in het reactiemengsel. Is er een sterkere oxidator, dan zal het Sn^{2+} -ion als reductor reageren en als er een sterkere reductor is zal Sn^{2+} -ion als oxidator reageren.

Stappenplan

Chroom en zoutzuur kunnen samen een redoxreactie aangaan. Chroom is een reductor, omdat het in staat is elektronen af te staan. H^+ is een oxidator, omdat het in staat is elektronen op te nemen. De beide halfreacties vind je in Binas tabel 48. Cr staat bij -0,74 V en H^+ staat bij 0 V. Je kunt nu de halfreacties uit de tabel combineren om een totaalreactie op te stellen.



11.14 Het is beter om een chromen velg niet schoon te maken met zoutzuur.

stap	actie
1	Inventariseer welke deeltjes er zijn.
2	Wat is de sterkste oxidator en wat is de sterkste reductor?
3	Verloopt de reactie?
4	Stel de halfreacties en de totaalreactie op.
5	Controle

11.15 Stappenplan redoxreactie

De halfreactie van chroom moet je vermenigvuldigen met 2 en de halfreactie van H^+ met 3, want het aantal elektronen dat wordt opgenomen door de oxidator moet gelijk zijn aan het aantal elektronen dat wordt afgestaan door de reductor.

De redoxreactie is aflopend omdat $\Delta V_0 > 0,3 \text{ V}$.

$$\Delta V_0 = 0 \text{ V} - (-0,74 \text{ V}) = 0,74 \text{ V}$$

Als je het metaal koper in zoutzuur doet, zal er geen redoxreactie optreden. Koper is een zwakkere reductor dan chroom en heeft een elektrodepotentiaal van 0,34 V. Koper reageert niet met de H^+ -ionen uit zoutzuur omdat $\Delta V_0 < -0,3 \text{ V}$.

$$\Delta V_0 = 0 \text{ V} - 0,34 \text{ V} = -0,34 \text{ V}$$

Net als bij zuur-basereacties kun je het opstellen van een redoxreactie systematisch aanpakken. In tabel 11.15 hiernaast staat een **stappenplan redoxreactie** dat je hiervoor kunt gebruiken. Een nadere uitleg van het stappenplan vind je in voorbeeld 1 en 2.



11.16 Een ets van Michael Japkes. Het maken van etsen gebeurt met koperen platen, waar het beeld met een redoxreactie in wordt geëtsd.

Voorbeeld 1

Geef de vergelijking van de redoxreactie die verloopt als je een staafje kobalt in een oplossing van koperchloride plaatst.

Stap 1: Inventariseer welke deeltjes er zijn: $Co(s)$, $Cu^{2+}(aq)$, $Cl^-(aq)$ en $H_2O(l)$.

Stap 2: Wat is de sterkste oxidator en wat is de sterkste reductor?

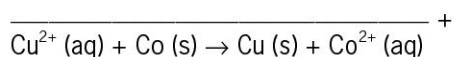
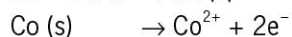
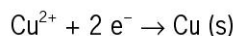
De sterkste oxidator vind je door in Binas tabel 48 in de kolom van de oxidatoren (linkerkolom) het deeltje te zoeken met de hoogste potentiaal. De sterkste oxidator die je op deze manier tegenkomt is Cu^{2+} (grootste V_0 , met een potentiaal van +0,34 V). In de kolom van de reductoren (rechterkolom) ga je op zoek naar het deeltje met de laagste potentiaal. De sterkste reductor die je op deze manier tegenkomt is Co (kleinste V_0 , met een potentiaal van -0,28 V).

Stap 3: Verloopt de reactie?

$$\Delta V_0 = V_0(ox) - V_0(red) = 0,34 \text{ V} - (-0,28 \text{ V}) = 0,62 \text{ V}, \text{ dus er is een aflopende reactie.}$$

Stap 4: Stel de halfreacties en de totaalreactie op.

Let op dat je bij het overnemen van de halfreacties uit Binas de halfreactie van de oxidator van links naar rechts overneemt. De halfreactie van de reductor moet je juist van rechts naar links overnemen.



Stap 5: Controle

Controleer of er elektronen in de totaalreactie staan. Controleer de elementen- en de ladingsbalans en controleer of er ook nog andere reacties kunnen optreden. Geen van alle is het geval.

● **Experiment 11.3**

Voorbeeld 2

Geef de vergelijking van de redoxreactie die verloopt als aan broomwater een stukje aluminium wordt toegevoegd.

Stap 1:

Let op, broomwater is een oplossing van de moleculaire stof broom in water (zie Binas tabel 66A).

$\text{Br}_2(\text{aq})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ en $\text{Al}(\text{s})$

Stap 2:

Het deeltje van stap 1 dat het hoogste in de kolom van oxidatoren staat is Br_2 met een potentiaal van +1,09 V. Dus de sterkste oxidator is Br_2 .

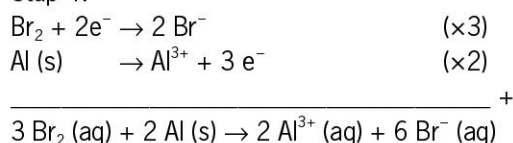
Het deeltje van stap 1 dat het laagste in de kolom van reductoren staat is Al met een potentiaal van -1,66 V. Dus de sterkste reductor is Al .

Stap 3:

$$\Delta V_0 = V_0(\text{ox}) - V_0(\text{red}) = 1,09 \text{ V} - (-1,66 \text{ V}) = 2,75 \text{ V}$$

Er is dus een aflopende reactie.

Stap 4:



Stap 5:

De elementenbalans en ladingsbalans klopt. Er staan geen elektronen in de totaalreactie en er zijn geen andere reacties. Je zou bij deze reactie nog kunnen controleren in Binas tabel 45A of er een neerslagreactie optreedt tussen Al^{3+} en Br^- . Dat is niet het geval.



11.17 Gloeiend vloeibaar ijzer wordt vanuit een hoogoven in een kuip gegoten. De productie van ijzer is een van de bekendste processen waarbij redoxreacties verlopen.

Samenvatting

- Hoe hoger de standaardelektrodepotentiaal van een metaal, hoe slechter het metaal als reductor kan reageren en des te edeler het metaal is.
- Een redoxreactie is aflopend als $\Delta V_0 \geq 0,3 \text{ V}$, is een evenwichtsreactie als $-0,3 \text{ V} < \Delta V_0 < 0,3 \text{ V}$ en verloopt niet als $\Delta V_0 \leq -0,3 \text{ V}$.
- Voor het opstellen van een redoxreactie moet je alle deeltjes inventariseren, de sterkste oxidator en reductor zoeken, controleren of de reactie kan verlopen en met behulp van de halfreacties de totaalreactie opstellen. Ten slotte controleer je of de elementen- en ladingsbalans klopt en of er nog andere reacties verlopen.

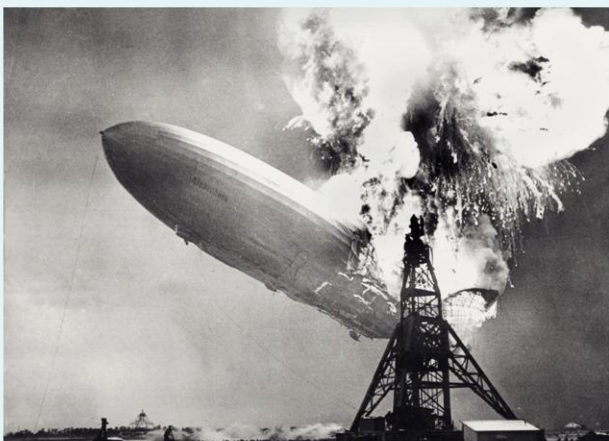
De Hindenburgramp

De Hindenburg was ontworpen en gemaakt door de Duitse Zeppelinmaatschappij. De eerste vlucht van de Hindenburg was in maart 1936. De laatste vlucht was op 6 mei 1937. Tijdens de landing in het Amerikaanse Lakehurst ging het fout met de zeppelin.

De Hindenburg bestond uit verschillende cellen waarbinnen het dragergas werd opgesloten. Helium en waterstofgas zijn de enige gassen die geschikt waren om het luchtschip te laten vliegen. De Zeppelinmaatschappij wilde de waterstofgascellen omringen door heliumcellen omdat helium niet brandbaar is. Helium was in 1936 echter zeldzaam en kon alleen worden verkregen via Amerika. De Amerikanen verboden echter de export van het heliumgas naar de Duitsers. Het Duitse bedrijf besloot om de Hindenburg in zijn geheel te vullen met waterstofgascellen. Bijkomend voordeel was dat de Duitsers de passagierscapaciteit konden verhogen.

De beslissing om de Hindenburg te vullen met het licht ontvlambare waterstofgas was volgens het eerste onderzoek de oorzaak van de teloorgang van de Hindenburg. Er werd in dit onderzoek geconcludeerd dat de Hindenburg waterstofgas lekte. Dit waterstofgas werd ontstoken via een elektrische vonk. Het gevolg hiervan is te zien in figuur 11.18.

Voorstanders van waterstofgas als energiedrager betwijfelden of de ramp met de Hindenburg werd veroorzaakt door elektrostatische ontsteking van een waterstofgaslekage.



11.18 De ramp van de zeppelin Hindenburg tijdens de landing in het Amerikaanse Lakehurst

De Amerikaan Addison Bain, werkzaam bij de NASA bij verschillende waterstofprogramma's, heeft onderzoek gedaan naar de werkelijke oorzaak van de Hindenburg-ramp. Naast het bestuderen van literatuur en beeldmateriaal over de Hindenburgramp ging hij ook op zoek naar overgebleven originele bekleding van de Hindenburg-zeppelin.



11.19 Een stukje originele bekleding van de Hindenburg. Volgens de Amerikaan Addison Bain een van de factoren die een rol speelde in de ramp met de zeppelin.

Bain ontdekte dat de bekleding van de Hindenburg in combinatie met de elektrostatische lading in de lucht tijdens de ramp de oorzaak was voor de ontbranding van de Hindenburg. De aanwezigheid van het waterstofgas verergerde de ramp, maar was niet de oorzaak van de ontvlaming.

De bekleding van de Hindenburg bestond onder andere uit aluminium poeder, celluloseacetaat en ijzer(III)oxide. Het aluminiumpoeder werd aangebracht op de buitenkant van de bekleding en het ijzer(III)oxide werd aangebracht op de binnenkant van de bekleding (figuur 11.19). Per 53 gram aluminiumpoeder werd ongeveer 10 gram ijzer(III)oxide gebruikt. Het aluminiumpoeder kan met het ijzer(III)oxide onder de juiste omstandigheden een exotherme redoxreactie aangaan.

Tot op vandaag is er nog steeds discussie over de oorzaak van de Hindenburgramp. Er zijn wetenschappers die de theorie van Bain ondersteunen, maar er zijn ook wetenschappers die de theorie van het lekkende waterstofgas ondersteunen.

● Opdracht C20

Opdrachten

A 11 

Kies in de volgende zinnen het juiste antwoord.

- a** Hoe sterker een reductor, hoe hoger / lager deze in Binas tabel 48 staat.
- b** Als ΔV_0 gelijk is aan 0,20 is er sprake van een evenwichtsreactie / een aflopende reactie.

B 12

- a** Rangschik de volgende deeltjes naar afnemende oxidatorsterkte: Co^{2+} , Pb^{2+} en Ag^+ .
- b** Geef de formules van de geconjugeerde reductoren van elk van de deeltjes uit vraag a.
- c** Geef de volgorde in reductorsterkte van deze reductoren.

B 13 

Geef de notatie met toestandsaanduiding van:

- a** koper
- b** ijzer(II)chloride
- c** een bariumchloride-oplossing
- d** gips
- e** een oplossing van chloor in water
- f** een $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ -oplossing

B 14

Natrium is een heel sterke reductor. Het natriumion is juist een heel zwakke oxidator.

- a** Leg uit wat het een met het ander te maken heeft.
- b** Leg uit waarom natrium niet als element in de natuur voorkomt.

B 15

Stel de vergelijkingen op van de redoxreacties die kunnen optreden als je de volgende stoffen (of oplossingen) samenvoegt. Doe dit aan de hand van de halfreacties uit Binas. Geef aan of de reactie afloopt of een evenwicht is.

- a** $\text{Ni (s)} + \text{CoCl}_2\text{-oplossing}$
- b** $\text{FeBr}_3\text{-oplossing} + \text{KI-oplossing}$
- c** $\text{Ca (s)} + \text{H}_2\text{O (l)}$
- d** $\text{Al (s)} + \text{ZnCl}_2\text{-oplossing}$
- e** $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4\text{-oplossing} + \text{Br}_2\text{-oplossing}$
- f** $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{-oplossing} + \text{I}_2\text{-oplossing}$

B 16

Als je experiment 11.3 hebt uitgevoerd, heb je gewerkt met chloorwater, broomwater en joodwater.

- a** Geef van alle drie de oplossingen de notatie.

- b** Leg uit welke van deze drie oplossingen de sterkste oxidator bevat en welke de zwakste oxidator.

In dit experiment wordt niet gesproken over fluorwater.

- c** Leg uit met behulp van Binas tabel 48 waarom je fluorwater niet kunt maken.

B 17

- a** Zet de volgende metalen op volgorde van edelheid: kobalt, goud, kwik en magnesium.
- b** Leg uit hoe je aan de standaardelektrodepotentiaal kunt zien dat magnesium wel met water reageert en kobalt niet.

Kobalt reageert wel met zoutzuur.

- c** Stel de vergelijking op van de reactie die dan optreedt.

Goud wordt vaak gebruikt voor sieraden en soms ook heel ongewoon toegepast, zie figuur 11.20.

- d** Leg uit waarom juist goud heel geschikt is voor sieraden.



11.20 In New York is voor 26 000 dollar een gouden toetje te krijgen. Het toetje van exclusieve chocoladesoorten is bestrooid met eetbaar goud. Als je het toetje hebt opgegeten, krijg je het blad met de coupe, het gouden lepeltje met diamanten en nog een gouden armband mee naar huis. Kortom een koopje.

C 18 ★

Jan, de scheikunde-TOA van een grote school, wil zilver terugwinnen uit een afvalvat voor zilverresten. Hij bewerkt 7,50 liter van deze vloeistof. De zilverconcentratie van deze oplossing is 0,0532 M. Eerst voegt hij een overmaat kaliloog toe. Hierdoor slaat zilveroxide neer.

Er ontstaat bij deze reactie water. Jan verzamelt het neergeslagen zilveroxide en verhit sterk. Hierdoor ontstaan zilver en zuurstof.

- Geef de vergelijking voor elk van beide reacties.
- Leg uit of het omzetten van zilveroxide in zilver en zuurstof een redoxreactie is.
- Bereken hoeveel gram zilver Jan op deze manier terugwint als je ervan uitgaat dat de uiteindelijk opbrengst 80% is van de maximaal te verkrijgen opbrengst.

Behalve bescherming van het milieu, op zichzelf al een mooi doel, levert het terugwinnen van zilver ook nog geld op. De zilverprijs schommelt een beetje. De prijs van zilver is € 25,94 per ounce. Een ounce is een twaalfde deel van een troy pound (= 373,2417 gram).

- Bereken hoeveel euro Jan heeft bespaard.

C 19

Boaz moet samen met Jara van hun scheikundedocent een opdracht maken waarbij ze reactievergelijkingen van redoxreacties opstellen. De opdracht luidt als volgt:

Een schepje van de stof ijzer(II)chloride wordt opgelost in water en verdeeld over twee reageerbuisen. In de eerste reageerbuis wordt een stukje aluminium gedaan, aan de tweede reageerbuis wordt wat broomwater toegevoegd. Geef de vergelijkingen van de redoxreacties die optreden.

Omdat ze een beetje tempo willen maken, besluiten ze dat Boaz aan de slag gaat met de reactie in reageerbuis 1. Jara kijkt juist naar de reactie van reageerbuis 2. Vervolgens schrijven ze snel de antwoorden van elkaar over. Jara werkt de opdracht alleen uit, omdat ze er zo veel mogelijk van wil leren. Ze komt er al snel achter dat er iets bijzonders aan de hand is met het Fe^{2+} -ion.

- Geef de vergelijking van de reactie die optreedt in reageerbuis 1.
- Geef de vergelijking van de reactie die optreedt in reageerbuis 2.
- Waar denk je dat Jara achter komt? Wat is er aan de hand met het Fe^{2+} -ion?

In de volgende les geeft de docent een vervolgo opdracht. Ook hierbij moeten de leerlingen een redoxreactie opstellen. De opdracht luidt:

Wat denk je dat er gebeurt als aan een stukje ijzer een overmaat broomwater wordt toegevoegd?

- Beschrijf dit proces in een reactievergelijking.

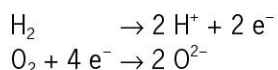
C 20

Lees de tekst in het kader 'Hindenburgramp' en beantwoord de volgende vragen.

In de tekst staat dat de Hindenburg werd gevuld met waterstofgascellen en dat daardoor de passagierscapaciteit kon worden verhoogd.

- Waarom kon de passagierscapaciteit worden verhoogd door voor waterstofgas te kiezen in plaats van het niet-ontvlambare helium?

De verbranding van waterstofgas is een redoxreactie, die je met de volgende twee halfreacties kunt weergeven:



- Laat zien dat je door de twee halfreacties te combineren uitkomt op de verbrandingsreactie van waterstof.

Volgens de theorie van Bain regeerde het aluminiumpoeder met ijzer(III)oxide tot aluminiumoxide en ijzer.

- Geef de vergelijking van deze reactie.
- Bereken de massaverhouding waarin aluminiumpoeder en ijzer(III)oxide moeten voorkomen om volledig te kunnen reageren.
- Haal uit de tekst in het kader twee argumenten die de conclusie van Bain verwerpen.

Experiment

11.3 Halogenen en redoxreacties

Je bepaalt welk halogeen de sterkste oxidator is.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- Binas tabel 48 gebruiken om een redoxreactie op te stellen;
- door gebruik te maken van de standaardelektrodepotentiaal bepalen of een redoxreactie aflopend is, een evenwicht is of niet verloopt.

Gouden munten

Deze pot met 108 gouden munten werd gevonden in een kruisvaarderskasteel uit de dertiende eeuw in Israël. Munten die net op goud lijken kun je zelf maken in een experiment waarbij je koperen munten kookt in geconcentreerd natronloog met zinkkorrels. De munt wordt zilverkleurig. Daarna verhitten in de vlam en er ontstaat een goudkleurig laagje messing.

**Je leert**

- hoe je rekening moet houden met het milieu waarin een oxidator of reductor reageert;
- hoe je een vergelijking kunt opstellen voor halfreacties die niet in Binas tabel 48 staan.

11.3 Redoxreacties in oplossing

● Experiment 11.4

Zuur, basisch of neutraal milieu

De natronloog voor het maken van de goudkleurige munt heeft twee functies: de OH^- -ionen verwijderen het vet op de muntjes waardoor het zink beter hecht en in combinatie met zink ontstaat een reductor die met water kan reageren. Water is dan de oxidator. De reductor zink zelf is niet sterk genoeg om met water te reageren. In Binas tabel 48 zie je dat $\text{Zn (s)} + 4 \text{ OH}^-$ lager staat in de lijst van reductoren dan Zn (s) .

Er ontstaan bij deze reactie Zn(OH)_4^{2-} -ionen. In een tweede redoxreactie worden de Zn(OH)_4^{2-} -ionen op het koperen oppervlak weer omgezet in zink.



11.21 Een natuurlijke 'hot spring' met zwavelzuur in Yellowstone National Park

Bij redoxreacties is het milieu waarin de reactie verloopt van belang. De deeltjes OH^- , H_2O en H^+ kunnen betrokken zijn bij halfreacties. Het is daarom bij het opstellen van een redoxreactie belangrijk dat je eerst een inventarisatie maakt van alle deeltjes die aanwezig zijn.

Bij het gebruik van Binas tabel 48 zijn er verder een aantal zaken waarop je moet letten.

- Onder andere omstandigheden dan in Binas zijn weergegeven hebben de elektrodepotentialen andere waarden.
- De oxidatoren HSO_4^- en SO_4^{2-} reageren alleen in warm geconcentreerd zwavelzuur. (figuur 11.21).

In de volgende twee voorbeelden zie je hoe een redoxreactie met dezelfde beginstoffen in een niet-aangezuurde oplossing (voorbeeld 1) een heel ander verloop heeft dan in een aangezuurde oplossing (voorbeeld 2).

Voorbeeld 1

Stel de reactievergelijking op van de redoxreactie die verloopt als je een oplossing van kaliumjodide samenvoegt met een oplossing van kaliumpermanganaat (KMnO_4) (figuur 11.22).

Stap 1:

De aanwezige deeltjes zijn: K^+ , MnO_4^- , H_2O en I^- .

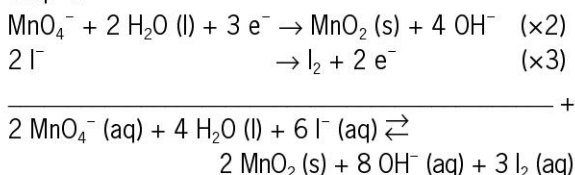
Stap 2:

De sterkste oxidator is MnO_4^- met een potentiaal van +0,60 V, de sterkste reductor is I^- met een potentiaal van +0,54 V.

Stap 3:

$\Delta V_0 = 0,60 \text{ V} - 0,54 \text{ V} = 0,06 \text{ V}$, er is dus sprake van een evenwichtsreactie.

Stap 4:



Stap 5:

Er verlopen geen andere reacties.

Voorbeeld 2

Stel de reactievergelijking op van de redoxreactie die verloopt als je een oplossing van kaliumjodide samenvoegt met een aangezuurde oplossing van kaliumpermanganaat (KMnO_4).

Stap 1:

De aanwezige deeltjes zijn: K^+ , H^+ , MnO_4^- , H_2O en I^- .

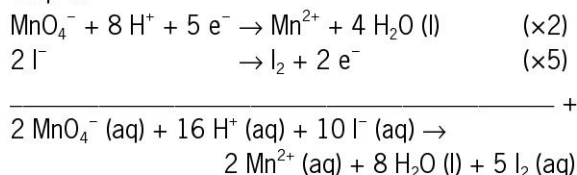
Stap 2:

Nu zie je dat MnO_4^- in combinatie met H^+ (potentiaal van +1,51 V) een sterkere oxidator is dan MnO_4^- in water. De sterkste reductor is I^- .

Stap 3:

$\Delta V_0 = 1,51 \text{ V} - 0,54 \text{ V} = 0,97 \text{ V}$, er is dus een aflopende reactie.

Stap 4:



Stap 5:

Er verlopen geen andere reacties.



11.22 Een aangezuurde kaliumpermanganaatoplossing wordt vaak gebruikt bij redox titraties omdat ze een sterke oxidator is en een specifieke kleur bezit.



11.23 Titratie van een kleurloze oplossing van oxaalzuur met een aangezuurde geel/oranje oplossing van kaliumdichromaat. Er ontstaat een groene oplossing door Cr^{3+} -ionen.

- Experiment 11.5
- Experiment 11.6
- Experiment 11.7

Voorbeeld 3

Geef de vergelijking van de reactie die verloopt als je een aangezuurde oplossing van kaliumdichromaat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) bij een oplossing van oxaalzuur ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) voegt.

Stap 1:

De aanwezige deeltjes zijn: K^+ , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, H_2O , H^+ en $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

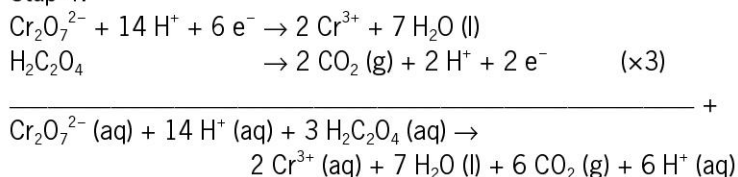
Stap 2:

De sterkste oxidator is $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+$ met een potentiaal van +1,36 V en de sterkste reductor is $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ met een potentiaal van -0,49 V.

Stap 3:

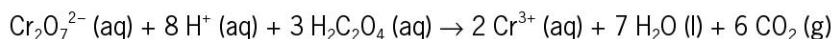
$\Delta V_0 = 1,36 \text{ V} - (-0,49) \text{ V} = 1,85 \text{ V}$, er is dus een aflopende reactie.

Stap 4:



Stap 5: Controle

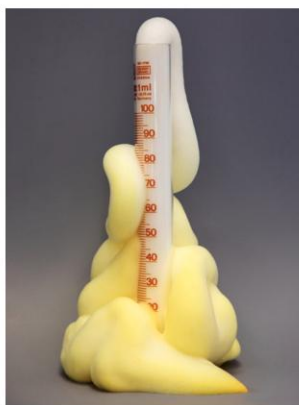
Zoals je ziet zijn er nu zowel voor als na de pijl H^+ -ionen aanwezig. Deze moet je tegen elkaar wegstrepen. Er blijven dan $14 - 6 = 8 \text{H}^+$ -ionen voor de pijl en geen H^+ -ionen na de pijl over.



Zelf halfreacties opstellen

In de vorige paragrafen hebben we gekeken naar redoxreacties en het opstellen van de reactievergelijkingen van redoxreacties. De redoxkoppels die bij deze reacties een rol speelden kon je allemaal opzoeken in Binas tabel 48. Maar er zijn natuurlijk veel meer redoxkoppels dan in de tabel staan.

Als een redoxkoppel niet in Binas tabel 48 staat, moet je zelf de halfreactie opstellen. Voor het zelf opstellen van een halfreactie kun je het **stappenplan halfreactie** gebruiken dat is opgenomen in tabel 11.25.



11.24 In experiment 11.6 doe je een verbazingwekkende waarneming, je ziet het ontstaan van de 'chemische drol'.

stap	actie
1	Noteer de gegeven deeltjes.
2	Stel de halfreactie van de deeltjes op. Zuur milieu: voor de pijl H^+ en eventueel H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag geen OH^- ontstaan. Basisch milieu: voor de pijl OH^- en eventueel H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag geen H^+ ontstaan. Neutraal milieu: voor de pijl H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag H^+ of OH^- ontstaan.
3	Maak de deeltjes in de halfreactie kloppend.
4	Maak de lading in de halfreactie kloppend door het juiste aantal elektronen (e^-) toe te voegen.

11.25 Stappenplan halfreacties opstellen



11.26 Een synthetisch gemaakt bismutkristal met een iriserend oppervlak door een dun laagje bismut(III)oxide



11.27 Door het lage smeltpunt wordt bismut gebruikt in woodsmetaal, een legering van bismut, lood, tin en cadmium, die in sprinklerinstallaties zit als smeltzekering.

Voorbeeld 4

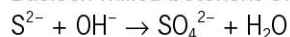
Sulfide ionen kunnen in basisch milieu worden omgezet tot sulfaationen. Stel de halfreactie op.

Stap 1:

Eerst noteer je de in de tekst gegeven deeltjes: $S^{2-} \rightarrow SO_4^{2-}$

Stap 2:

Basisch milieu betekent OH^- als hulpdeeltje voor de pijl en H_2O -moleculen na de pijl:



Stap 3:

Deeltjes kloppend maken: $S^{2-} + 8 OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + 4 H_2O$

Stap 4:

De lading kloppend maken door elektronen toe te voegen. Voor de pijl is de lading 10-, na de pijl is de lading 2-, dus moet je na de pijl $8 e^-$ toevoegen.



Voorbeeld 5

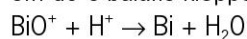
In zuur milieu wordt het bismution, BiO^+ , omgezet in het metaal bismut, Bi (figuur 11.26). Stel de halfreactie op.

Stap 1:

Noteer de gegeven deeltjes: $BiO^+ \rightarrow Bi$

Stap 2:

De reactie verloopt in zuur milieu, dus H^+ als hulpdeeltje voor de pijl en H_2O na de pijl om de O-balans kloppend te maken.

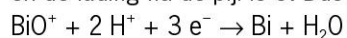


Stap 3:

Deeltjes kloppend maken: $BiO^+ + 2 H^+ \rightarrow Bi + H_2O$

Stap 4:

De lading kloppend maken door elektronen toe te voegen. De lading voor de pijl is 3+ en de lading na de pijl is 0. Dus voeg je voor de pijl drie elektronen toe.



Samenvatting

- De deeltjes H^+ , H_2O en OH^- kunnen invloed hebben op de sterkte van een reductor of oxidator en moeten dus worden meegenomen bij de inventarisatie van de deeltjes.
- SO_4^{2-} en HSO_4^- zijn alleen oxidator in warm geconcentreerd zwavelzuur.
- Voor het zelf opstellen van halfreacties zet je in zuur milieu voor de pijl H^+ en mag na de pijl geen OH^- ontstaan. In basisch milieu zet je voor de pijl OH^- en er mag na de pijl geen H^+ ontstaan. In neutraal milieu zet je voor de pijl H_2O en na de pijl mag H^+ of OH^- ontstaan. In zuur en basisch milieu kun je H_2O ook nog als hulpdeeltje gebruiken.

Opdrachten

A 21 

- a Welke hulpdeeltjes zijn aanwezig in zuur milieu?
- b Welke hulpdeeltjes zijn aanwezig in basisch milieu?

A 22 

Leg uit waarom het sulfaation in een natriumsulfaatoplossing geen oxidator is.

B 23

Maak de onderstaande halfreacties kloppend door de elektronen toe te voegen.

- a $\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+}$
- b $\text{MnO}_2(\text{s}) + 4 \text{H}^+ \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

B 24

In een aangezuurde oplossing van kaliumpermanganaat is behalve H^+ , ook H_2O aanwezig. Dit betekent dat je voor het MnO_4^- -ion zou kunnen 'kiezen' uit twee verschillende halfreacties. Toch zal er tijdens een redoxreactie geen vorming van MnO_2 optreden. Geef hiervoor een verklaring.

B 25

Stel de vergelijkingen op van de redoxreacties die kunnen optreden als je de volgende stoffen of oplossingen samenvoegt. Vermeld of de reactie afloopt of een evenwicht wordt.

- a Een aangezuurde H_2O_2 -oplossing wordt gevoegd bij een Na_2SO_3 -oplossing.
- b Een aangezuurde KMnO_4 -oplossing wordt gevoegd bij een $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -oplossing.
- c Een $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ -oplossing wordt gevoegd bij een Br_2 -oplossing.
- d $\text{SO}_2(\text{g})$ wordt ingeleid in een KClO_3 -oplossing die is aangezuurd met H_2SO_4 .

B 26

Geef de vergelijking van de halfreactie voor de omzetting van:

- a MnO_2 tot MnO_4^- (in basisch milieu)
- b ReO_2 tot Re (in zuur milieu)
- c Nb_2O_5 tot Nb (in zuur milieu)
- d HPbO_2^- tot Pb (er ontstaat een basische oplossing)

B 27

Tijdens de werking van sommige kopieerapparaten wordt het gas ozon gevormd. Ozon is een schadelijk gas. Om te controleren of de lucht in een ruimte met een kopieerappa-

raat niet te veel ozon bevat, wordt deze door een aangezuurde kaliumjodide-oplossing geleid. Geef de vergelijking van de reactie die dan zal optreden.

B 28

Als je een kaliumpermanganaatoplossing wilt aanzuren, gebruik je hiervoor geen zoutzuur omdat dan een ongewenste reactie optreedt. Stel de vergelijking van deze reactie op.

B 29 

- a Geef de vergelijking van de redoxreactie die optreedt als zwaveldioxide, $\text{SO}_2(\text{g})$, wordt geleid in broomwater.
- b Bij een oplossing van tin(II)jodide, SnI_2 , wordt langzaam chloorwater, $\text{Cl}_2(\text{aq})$, gedruppeld tot er een overmaat is toegevoegd. Geef de vergelijkingen van de optredende redoxreacties.

B 30

Je kunt je haar bleken met een H_2O_2 -oplossing. Niet H_2O_2 zelf is dan de oxidator, maar zuurstof die uit H_2O_2 ontstaat.

- a Geef de halfreactie voor het ontstaan van zuurstof uit H_2O_2 .

De kapper voegt ammonia toe om de schubben van het haar uiteen te laten gaan, maar ammonia heeft ook invloed op de sterkte van H_2O_2 als reductor. Waterstofperoxide reageert hier als reductor; er is dus een oxidator nodig: H_2O_2 zelf.

- b Geef de vergelijking van deze halfreactie.

In beide halfreacties ontstaan ionen die met elkaar reageren.

- c Geef de vergelijking van de totale reactie.

B 31

Om een koperets te maken, kun je een plaat koper met was bedekken. Vervolgens maak je hierin een tekening. Daarna wordt de koperplaat in een oplossing gelegd, waarmee koper reageert. Alleen op die plaatsen waar de was is weggekrast, ontstaan dan groeven.

- a Leg uit waarom zoutzuur hiervoor geen geschikte oplossing is.

Je kunt wel gebruikmaken van een geconcentreerde salpeterzuuroplossing. Koper reageert hiermee onder vorming van onder andere $\text{NO}_2(\text{g})$.

- b Geef de vergelijking van de reactie die optreedt.

B 32

In calciumhydride, CaH_2 , komen hydride-ionen voor. Als je enige korreltjes calciumhydride in water brengt, volgt een heftige reactie. Er ontstaat een oplossing van calciumhydroxide en er ontwijkt waterstof.

- Geef de vergelijking voor deze reactie.
- Leg uit waarom de reactie een redoxreactie is.
- Leg uit of H^- in de reactie de oxidator is of de reductor.
- Leg uit of de reactie ook een zuur-basereactie is.

B 33

Het zout ijzer(III)sulfiet bestaat niet.

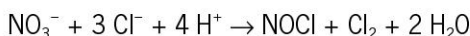
- Welke formule zou dit zout krijgen, als het wel bestond?
- Leg met een reactievergelijking uit waarom het niet mogelijk is de stof ijzer(III)sulfiet te maken uitgaande van een oplossing met onder andere Fe^{3+} -ionen en een oplossing met SO_3^{2-} -ionen.

C 34 ★

In het 4 vwo-boek heb je een context gelezen over het terugwinnen van goud uit mobieltjes (figuur 11.28). In deze opgave zoek je uit wat de chemie is achter de terugwinning van goud uit mobieltjes. Voor het recyclen van goud uit mobieltjes wordt gebruikgemaakt van koningswater. Koningwater is de triviale naam voor een 3 : 1 mengsel van geconcentreerd zoutzuur en salpeterzuur. Dit mengsel wordt koningswater genoemd omdat het in staat is edele metalen zoals goud en platina op te lossen.

- Laat aan de hand van Binas tabel 48 zien dat goud in alleen salpeterzuur niet oplost.

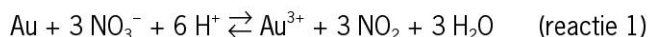
Bij het mengen van beide zuren treden reacties op die resulteren in de vorming van de vluchtige producten NOCl en Cl_2 .



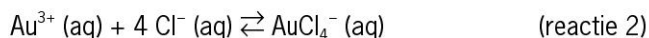
- Leg uit hoe je uit de formules kunt afleiden dat dit een redoxreactie is.
- Leg met behulp van Binas tabel 48 uit dat er bij de reactie tussen salpeterzuur en zoutzuur een oxidator ontstaat die sterker is dan het salpeterzuur.

De reactieproducten van bovenstaande reactie zijn verantwoordelijk voor het roken van de oplossing en de typisch oranje/gele kleur van koningswater. Door het zeer reactieve NOCl krijgt het koningswater zijn bijzondere eigenschappen. Als de vluchtige componenten uit de oplossing verdwijnen, verliest het koningswater aan sterkte.

Het oplossen van goud in koningswater blijkt gebaseerd op twee achter elkaar verlopende reacties:



Gevolgd door de vorming van het tetrachloorauroaat (AuCl_4^-):



Het evenwicht van reactie 2 ligt sterk naar rechts.

- Leg uit wat voor effect dit heeft op de concentratie van de goudionen.

Door reactie 2 kan reactie 1 nu wel verlopen.

- Bereken wat het effect van reactie 2 op de elektrodepotentiaal van Au zal zijn. Tip: lees de toelichting boven aan Binas tabel 48.



11.28 Ongeveer 50 000 oude gsm's leveren 1 kg goud.

C 35 Hoogovens

In een hoogoven worden cokes (bijna pure koolstof) en ijzererts omgezet tot ruw ijzer en koolstofmono-oxide. De vorm van de hoogoven zorgt ervoor dat de productie van ijzer uit ijzererts optimaal verloopt, zie figuur 11.29.

Allereerst wordt de cokes omgezet tot koolstofmono-oxide. Dit is een aflopende reactie.

- Geef dit in een reactievergelijking weer.

De koolstofmono-oxide reageert met ijzer(III)oxide, hierbij ontstaan ijzer(II)oxide en koolstofdioxide. Dit is een endotherme evenwichtsreactie.

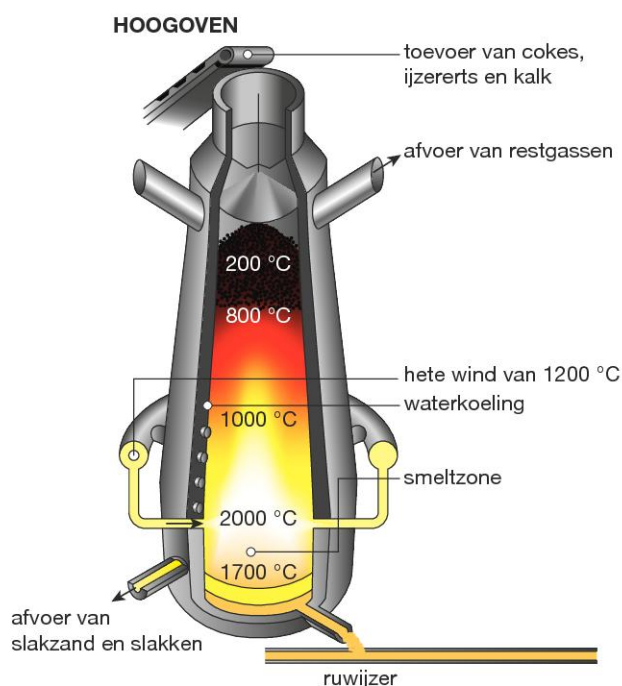
- Geef dit in een reactievergelijking weer.
- Leg uit waarom dit een redoxreactie is.

Het ijzer(II)oxide reageert vervolgens met koolstofmono-oxide en er worden ijzer en koolstofdioxide gevormd.

- Geef de reactievergelijking van deze exotherme evenwichtsreactie.

Het koolstofdioxide dat is ontstaan reageert met koolstof om weer koolstofmono-oxide te vormen.

- e Geef de reactievergelijking van deze endotherme evenwichtsreactie.

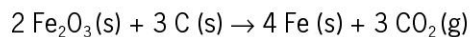


11.29 Schematische weergave van een hoogoven

Er reageert ook koolstof met zuurstof om koolstofdioxide te vormen. Dit is een aflopende exotherme reactie en dient tevens om de hoogoven op temperatuur te houden. De ligging van een evenwicht is afhankelijk van de temperatuur. Bij temperatuurverhoging verschuift het evenwicht naar de endotherme kant, bij temperatuurverlaging naar de exotherme kant.

- f Leg uit welke evenwichtsreacties meer naar rechts verlopen als de temperatuur wordt verhoogd.
g Welke reactie verloopt meer naar links als de temperatuur wordt verhoogd en wat is daarbij het probleem?

Als het ijzer vast is, maakt dit het lastig om de stoffen te scheiden. Doordat alleen onder in de oven wordt gestookt, neemt de temperatuur van onder naar boven af. Omdat onder in voortdurend ijzer wordt afgetapt, zakt nieuw gevormd ijzer steeds naar onderen. Hier wordt het vloeibaar. Dit afgetapt ijzer is ruwijzer omdat het nog ongeveer 5 massa-% koolstof bevat. De totale reactievergelijking kun je als volgt weergeven:



- h Leg uit welk deeltje in deze reactie de oxidator en welk deeltje de reductor is.

Het ruwijzer uit de hoogoven is nog geen staal. IJzer omzetten in staal betekent vooral het verlagen van het koolstofgehalte. Ruwijzer bevat veel koolstof, waardoor het gestolde materiaal bros is en niet is te lassen, te smeden of te vervormen. In de staalfabriek wordt in de 'oxystaalconvector' het koolstof uit het vloeibare ijzer verbrand door er met grote kracht zuurstof door te blazen. De temperatuur loopt daarbij op tot circa 2000 °C.

Om de temperatuur niet verder te laten stijgen wordt schroot toegevoegd aan het vloeibare ijzer. Schroot is gebruikt staal, dat via de schroothandel en huisvuilverbrandingsinstallaties weer is te gebruiken bij de productie van nieuw staal. Naarmate er langer zuurstof wordt doorgeblazen blijft er minder koolstof achter. Zo kan staal met een bepaald koolstofgehalte (0,1 tot 1,5 massa-%) op bestelling worden geleverd. Ruwijzer bevat 5 massa-% koolstof. Een bedrijf bestelt bij Tata Steel 10 ton staal met een koolstofgehalte van 0,8 massa-%.

- i Bereken hoeveel kilogram koolstof er moet worden verwijderd.

Experimenten

11.4 Het permanganaation

Je onderzoekt hoe het permanganaation reageert.

11.5 Redoxreacties

Je voorspelt of redoxreacties verlopen en voert deze reacties vervolgens uit.

11.6 Chemische drol

Kun je het ontleden van waterstofperoxide versnellen?

11.7 Dansend natrium

Wat gebeurt er als een stukje natrium in water wordt gedaan?

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat de invloed is van een zuur, basisch of neutraal milieu op het verloop van een redoxreactie;
- met behulp van een stappenplan halfreacties opstellen zonder ondersteuning van de tabel in Binas.

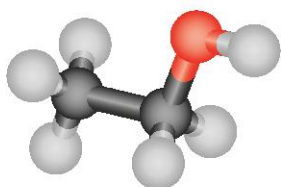
Rode wijn

Wijn bevat van nature altijd sulfiet, omdat het bij de gisting van de druiven vrijkomt. Daarnaast wordt vooral bij witte wijnen vaak extra sulfiet toegevoegd. Het sulfiet voorkomt dat de alcoholen gaan oxideren. De oxidatie van alcoholen geeft een zure bijsmaak aan de wijn. Een te hoog gehalte aan sulfiet kan echter lijden tot hoofdpijn na slechts één glas wijn.

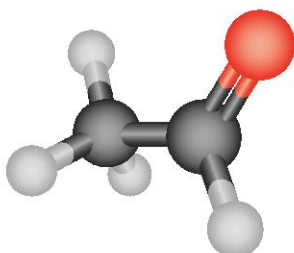
**Je leert**

- halfreacties van alcoholen en aldehyden als reductor op te stellen;
- hoe je een kwantitatieve berekening kunt uitvoeren aan redoxtitraties.

11.4 Toepassingen

● **Experiment 11.8**● **Experiment 11.9**

11.30 Molecuulmodel van ethanol

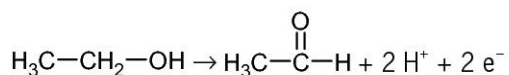


11.31 Molecuulmodel van ethanal

Alcoholen als reductor

Uit de openingstekst van deze paragraaf blijkt dat een teveel aan sulfiet in wijn voor klachten kan zorgen. Sulfiet wordt aan wijn toegevoegd om de zure bijsmaak te voorkomen. Wat zijn de reacties van alcoholen waardoor deze zure bijsmaak ontstaat (figuur 11.30)? Alcoholen met een OH-groep aan het uiteinde van een koolstofketen kunnen met een oxidator reageren tot een aldehyde (figuur 11.31). Als ethanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) reageert met een oxidator ontstaat er ethanal (CH_3CHO).

Je ziet dat er twee H-atomen van het alcohol worden verwijderd. Het gaat om het H-atoom van de OH-groep en een H-atoom van het C-atoom waar de OH-groep aan is verbonden. Er ontstaat een dubbele binding tussen het O-atoom en het C-atoom. Ethanol reageert hier als een reductor en naast elektronen komen er ook H^+ -ionen vrij. Dit geeft de volgende halfreactie van ethanol:



In de aanwezigheid van een sterkere reductor reageert een aldehyde als oxidator en wordt dan weer omgezet in een alcohol. In de aanwezigheid van een sterkere oxidator reageert een aldehyde als reductor, waarbij een carbonzuur ontstaat. Zo kan ethanal verder reageren tot ethaanzuur, dit veroorzaakt de zure smaak van de wijn.



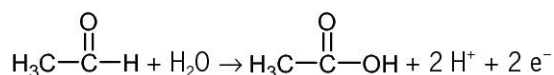


11.32 Een 15% azijnzuuroplossing is een milieuvriendelijk middel om onkruid te bestrijden.

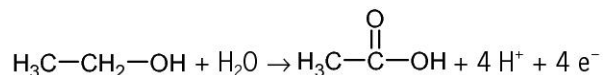


11.33 Aceton wordt gebruikt om beschadigd polyester te ontvetten voor een reparatie, zoals hier de zijkant van een zeilboot.

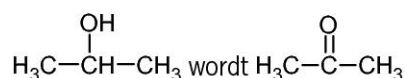
Ethaanzuur heeft een extra O-atoom ten opzichte van ethanal. In de halfreactie moet dus voor de pijl ook water voorkomen. Ethanal reageert hier als reductor en naast elektronen komen er ook H^+ -ionen vrij. De halfreactie van ethanal wordt dan:



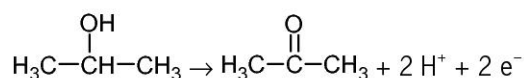
De omzetting van ethanol in azijnzuur kun je in één halfreactie weergeven:



Een alcohol, met een OH-groep die niet aan het uiteinde van een keten zit, reageert als reductor tot een keton. Voorwaarde is wel dat aan het C-atoom waaraan de OH-groep zit, ook nog een H-atoom zit. Zo reageert propaan-2-ol met een oxidator tot propanon (aceton):



Je ziet dat er weer twee H-atomen van het alcohol worden verwijderd en er weer een dubbele binding ontstaat tussen het O-atoom en het C-atoom. De halfreactie voor propaan-2-ol als reductor is:



Alcoholen met een OH-groep aan een C-atoom waar geen H-atoom meer zit, kunnen niet als reductor reageren. Er kan dan geen dubbele binding ontstaan tussen het O-atoom en het C-atoom.

Redoxtitraties

Als je wilt controleren of het sulfietgehalte in witte wijn voldoet aan de wettelijke norm, kun je dat doen met een titratie. In hoofdstuk 9 zijn de zuur-basetitraties besproken. Het principe van een zuur-basetitratie geldt ook voor een redoxtitratie. Bij een zuur-basetitratie hebben in het equivalentiepunt alle zure deeltjes gereageerd met de base. Bij **redoxtitraties** hebben in het equivalentiepunt alle oxidatordeeltjes gereageerd met reductordeeltjes. De berekeningen bij redoxtitraties zijn hetzelfde als bij zuur-basetitraties. Een voordeel van redoxtitraties is dat de deelnemende stoffen bij het equivalentiepunt vaak zelf van kleur veranderen. Hierdoor is het niet altijd nodig om een indicator toe te voegen.

- Experiment 11.10
- Experiment 11.11
- Experiment 11.12

Samenvatting

- De halfreacties van alcoholen als reductor moet je zelf opstellen door het toevoegen van H^+ , e^- en eventueel H_2O .
- Bij redoxtitraties hebben in het equivalentiepunt alle oxidatordeeltjes gereageerd met alle reductordeeltjes.

Stoppen we straks ijzer in de tank?

Wetenschappers van de Technische Universiteit Eindhoven onder leiding van hoogleraar Philip de Goey onderzoeken of ijzerpoeder kan worden gebruikt als brandstof voor motoren. In eerste instantie denken de onderzoekers vooral aan toepassingen voor zwaar transport over land en over zee.

Er wordt in hun visie geen diesel getankt, maar te denken valt aan cassettes met 10 kg ijzerpoeder. Bij de verbranding van het ijzerpoeder wordt het bruine ijzer(II)oxide gevormd. De verbranding vindt plaats door het ijzerpoeder via een elektrisch veld te verspreiden, waarna een klein vonkje de reactie van het ijzerpoeder met zuurstof uit de lucht activeert. Die reactie warmt de omgeving op, waardoor ook de andere ijzerdeeltjes gaan reageren. In figuur 11.34 zie je een demonstratie van de verbranding van 1 g metaalpoeder.

Het ijzer(II)oxide dat tijdens de reactie wordt gevormd kun je terugwinnen door er bij hoge temperaturen waterstof doorheen te blazen. Het ijzer(II)oxide wordt hierbij omgezet tot water en ijzer. Het ijzer kan hierna weer worden hergebruikt. Er moet nog wel onderzoek worden gedaan naar het opvangen van het ijzer(II)oxide na de verbranding.

Volgens de onderzoekers is ijzer een heel goede energiedrager. Bij de verbranding van ijzer tot ijzer(II)oxide komt per 1,00 kg ijzer $4,9 \cdot 10^6$ joule aan energie vrij. De warmte die vrijkomt bij de verbranding van diesel is gelijk aan 42,7 MJ per kilogram. De dichtheid van diesel is ongeveer gelijk aan 0,823 kg per liter. De onderzoekers denken dat het haalbaar is om 25% van de vrijgekomen energie bij de verbranding van ijzerpoeder nuttig te kunnen gebruiken. Dit rendement lijkt laag, maar is vergelijkbaar met het rendement van een normale verbrandingsmotor.

De onderzoekers verwachten dat metaalbrandstoffen zeker in het zeetransport een belangrijke rol kunnen spelen. Het volume van metaalbrandstoffen is relatief klein en het hoge gewicht maakt in een bulkcarrier niet zo veel uit.

Bij harde wind en flinke zonneschijn kan de overtolige elektriciteit die via windmolens en zonnepanelen wordt opgewekt, worden gebruikt voor de productie van waterstof uit water via elektrolyse. De waterstof kan dan worden gebruikt voor het recyclen van ijzer uit ijzer(II)-oxide. Op deze manier is de cyclus duurzaam en komt er minder CO_2 vrij.

Bron: TU Eindhoven en de Volkskrant



11.34 Demonstratie van de verbranding van 1 gram metaalpoeder in de lucht.

● Opdracht C45

Opdrachten

B 36 

Geef de halfreacties in structuurformules van de volgende verbindingen wanneer deze als reductor reageren:

- a** propaan-2-ol
- b** 3-methylbutaan-1-ol tot een aldehyde
- c** 3-methylbutaan-1-ol tot een carbonzuur

B 37 

Tijdens de reactie van ethanol met een aangezuurde oplossing van kaliumdichromaat ontstaat geen ethanal als eindproduct, maar ethaanzuur.

Geef de halfreacties en de vergelijking van de totaalreactie.

B 38

Bij de reactie van methanol met een overmaat krachtige oxidator, ontstaan achtereenvolgens methanal, methaanzuur, en koolstofdioxide (plus water).

- a** Geef de halfreacties van elk van deze drie processen. Gebruik structuurformules.
- b** Verklaar waardoor methaanzuur wel verder kan reageren, maar ethaanzuur niet.

B 39

Propanal vormt een redoxkoppel met propaan-1-ol, propanon met propaan-2-ol.

- a** Is de alcohol in dergelijke redoxkoppels de oxidator of de reductor?
- b** Geef de vergelijking in structuurformules voor de reactie van propanon met waterstofgas in aanwezigheid van nikkel als katalysator; er ontstaat propaan-2-ol.
- c** Leg uit dat je de reactie bij b kunt opvatten als redoxreactie, maar ook als additiereactie.

B 40

Wijn blijft langer goed bij een lage pH. In paragraaf 11.3 heb je gezien dat oxidatoren vaak sterker worden in aangezuurde oplossingen.

- a** Leg uit waarom rode wijnen bij een lage pH in verhouding toch langer goed blijven. Betrek in je antwoord ook het gegeven dat de reacties van alcoholen als reductor evenwichtsreacties zijn.
- b** Welke verklaring kun je nog geven voor het langer goed blijven van rode wijn bij een lage pH?

C 41

Bij de eerste stap van de afbraak van alcohol in de lever wordt alcohol omgezet in ethanal.

- a** Geef de structuurformules van ethanol en ethanal.
- b** Geef de molecuulformules van ethanol en ethanal.
- c** Geef de halfreactie van de omzetting van ethanol in ethanal. Gebruik molecuulformules.

Als oxidator wordt NAD^+ gebruikt dat daarbij wordt omgezet in NADH.

- d** Geef daarvan de halfreactie.
- e** Geef de totale vergelijking van de omzetting van ethanol in ethanal door NAD^+ . Gebruik molecuulformules.

In de tweede stap wordt ethanal omgezet in azijnzuur.

- f** Geef de halfreacties in molecuulformules van deze stap.

Voor beide stappen wordt een dehydrogenase als enzym gebruikt.

- g** Leg uit waarom deze enzymen dehydrogenase worden genoemd.

Ten slotte wordt azijnzuur uiteindelijk omgezet in CO_2 en H_2O .

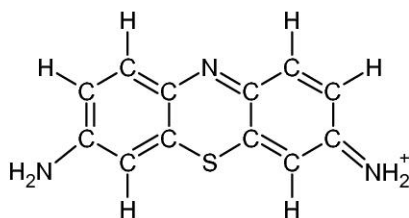
- h** Geef hiervan de halfreactie. Gebruik molecuulformules.
- i** Leg uit hoeveel NAD^+ hiervoor wordt gebruikt als alleen NAD^+ als oxidator optreedt.

C 42

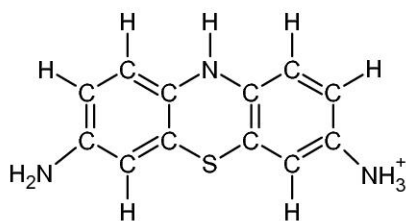
Naast zuur-base-indicatoren bestaan er ook redoxindicatoren. Deze redoxindicatoren zijn vaak gekleurd, maar slaan soms om van of naar kleurloos.

- a** Waarom kun je een indicator die van kleurloos naar kleurloos omslaat niet gebruiken?

Thionine is een redoxindicator, zie Binas tabel 52B. Deze stof slaat om van kleurloos naar violet. Thionine kan reageren als oxidator en als reductor. Op internet zijn twee structuurformules te vinden voor de beide vormen van thionine:



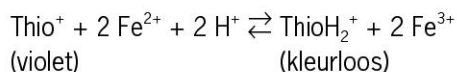
violet (Thio^+)



kleurloos (ThioH_2^+)

- b** Leg aan de hand van deze afbeeldingen uit of het violette thionine een reductor is of een oxidator.

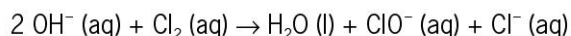
In dezelfde bron staat de volgende redoxreactievergelijking:



- c** Ga met de overgangspotentiaal (V_0) van thionine in Binas tabel 52B en de V_0 van Fe^{2+} na of deze reactie bij voorkeur naar links of bij voorkeur naar rechts zal verlopen.
- d** Als je wat kleurloze thionine aan een oplossing toevoegt en de oplossing wordt violet, wat heb je dan aangetoond? Merk ook iets op over de V_0 .

C 43 Bleekloog

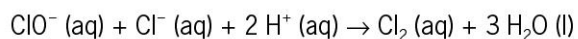
Bleekloog is een huishoudmiddel met als actief bestanddeel natriumhypochloriet (NaClO). Natriumhypochloriet is een sterke oxidator en wordt vaak gebruikt als desinfecterend schoonmaakmiddel. Natriumhypochloriet ontstaat wanneer bij lage temperaturen natronloog en chloor bij elkaar worden gevoegd. Er treedt dan de volgende reactie op:



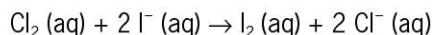
Dit is een zogenaamde autoredoxreactie, waarbij het ene chlooratoom het andere chlooratoom van een elektron berooft.

- a** Laat zien dat dit klopt door de ladingen van de chloordeeltjes te bespreken.

Bij toevoeging van zuur komt het chloor weer vrij:



Het chloor dat is gebonden en op bovenstaande wijze kan worden vrijgemaakt noem je 'werkzaam' of 'actief' chloor. Om het actief chloor in een bleekloog oplossing te bepalen, voeg je eerst een overmaat aangezuurde kaliumjodide-oplossing toe. Het zuur maakt het actief chloor vrij en dit reageert met I^- -ionen.



De hoeveelheid jood kan nu worden bepaald door middel van een titratie met een natriumthiosulfaatoplossing.

- b** Geef de redoxreactie van jood met een natriumthiosulfaatoplossing.

Je hebt de opdracht om te onderzoeken of een fles bleekwater voldoet aan de norm van 2,5 tot 11,1 g actief chloor per 100 mL. Je voert hiervoor het volgende onderzoek uit.

Pipetteer 25,00 mL bleekwater in een maatkolf van 100 mL en vul aan met demiwater tot 100 mL. Pipetteer 25,00 mL van de verdunde oplossing in een erlenmeyer van 250 mL. Voeg hieraan een overmaat aangezuurde kaliumjodide-oplossing toe.

Na het toevoegen van de aangezuurde kaliumjodide-oplossing titreer je met een 0,500 M natriumthiosulfaatoplossing. Vlak voor het equivalentiepunt voeg je wat zetmeeloplossing toe, zodat je een duidelijke omslag ziet van donkerblauw naar kleurloos. Voor de titratie heb je 17,5 mL 0,500 M natriumthiosulfaatoplossing nodig.

- c Bereken of de fles bleekloog voldoet aan de norm van 2,5 tot 11,1 g actief chloor per 100 mL.



11.35 Bleekloog moet vanwege zijn sterk oxiderende werking in pvc opslagtanks worden vervoerd. De opslagtanks zijn aan de buitenkant verstevigd met een glasvezelversterkte polyester.

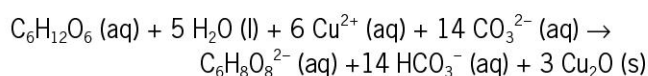
C 44 Lactosegehalte

Steeds meer mensen hebben last van een lactoseintolerantie (figuur 11.36). Het is daarom interessant om te weten hoeveel lactose er nu in magere melk zit. In het hieronder beschreven experiment hebben de leerlingen Janne en Loes het lactosegehalte van melk bepaald.

In een eerste stap wordt lactose, $C_{12}H_{22}O_{11}$, gehydrolyseerd tot glucose en fructose. Glucose en fructose hebben beide de molecuulformule $C_6H_{12}O_6$. Bij de hydrolyse reactie wordt gebruikgemaakt van water.

- a** Geef de hydrolyse reactie van lactose in molecuulformules.

De hydrolyse wordt uitgevoerd door een overmaat koper-sulfaatoplossing toe te voegen die basisch is gemaakt met opgelost natriumcarbonaat. De glucose en fructose die ontstaan reageren nu volgens onderstaande reactie.



Aan de overgebleven oplossing wordt nu een overmaat aangezuurde kaliumjodide-oplossing toegevoegd. De overgebleven Cu^{2+} -ionen reageren nu met de I^- -ionen tot koper(II)jodide en jood. De halfreacties van deze redoxreactie zijn te vinden in Binasc tabel 48.

- b** Geef de halfreacties en totaalreactie van Cu^{2+} met I^- .

Het gevormde jood wordt getitreerd met een natriumthiosulfaatoplossing.

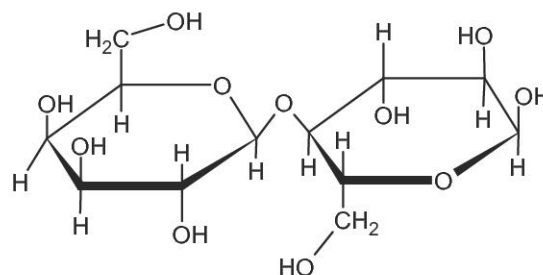
- c** Geef de redoxreactie tussen jood en natriumthiosulfaatoplossing.

Loes en Janne hebben de volgende experimentele gegevens genoteerd:

- 25,00 mL melk is overgebracht in een maatkolf van 250,00 mL. De maatkolf is met demiwater aangevuld tot 250,00 mL;
- 10,00 mL van de verdunde melk is gepipetteerd in een erlenmeyer;
- aan de erlenmeyer is 25,00 mL 0,1000 M basische kopersulfaatoplossing toegevoegd;
- het mengsel is gedurende tien minuten gekookt;
- na afkoelen is een overmaat aangezuurde kaliumjodide-oplossing toegevoegd;
- na toevoeging van 5 mL zetmeel oplossing is getitreerd met 0,1000 M natriumthiosulfaat oplossing tot een kleuromslag van blauw naar blijvend wit.

Loes en Janne hebben voor de titratie gemiddeld 10,15 mL 0,1000 M natriumthiosulfaatoplossing nodig gehad.

- d** Bereken met behulp van de experimentele gegevens het gehalte lactose van magere melk in gram per 100 mL.



11.36 Structuurformule van lactose

C 45

Lees de tekst in het kader 'Stoppen we straks ijzer in de tank?' en beantwoord de volgende vragen.

In de tekst staat dat ijzerpoeder met zuurstof uit de lucht reageert tot ijzer(II)oxide.

- a** Geef de redoxreactie voor de verbranding van het ijzerpoeder tot ijzer(II)oxide.

Het ijzer(II)oxide kan worden omgezet in zuiver ijzer door bij hoge temperaturen waterstof door het ijzer(II)oxide te blazen.

- b** Geef de redoxreactie van de recycling van ijzer uit het ijzer(II)oxide.
c Welk deeltje is bij deze reactie de oxidator en welk deeltje is bij deze reactie de reductor? Geef beide halfreacties.

Volgens de onderzoekers is een belangrijk voordeel van het gebruik van ijzerpoeder als brandstof ten opzichte van het gebruik van diesel als brandstof, de volumebesparing. Vooral bij zeetransporten speelt dit een grote rol omdat massa daar minder belangrijk is dan volume. Een gemiddelde olietanker gebruikt per dag ongeveer 260 000 L aan diesel.

- d** Bereken met behulp van gegevens uit de tekst wat het volume is aan ijzerpoeder dat je per dag nodig hebt voor dezelfde olietanker.

C 46 Ammonium uit afvalwater ★

Bij methodes om met behulp van bacteriën ammonium uit afvalwater te verwijderen, spelen reacties uit de stikstofkringloop een belangrijke rol. In de zogenoemde klassieke methode wordt ammonium eerst met behulp van zuurstof omgezet tot nitraat. Dit nitraat wordt vervolgens omgezet tot stikstof. In een ander proces, het SHARON-proces, wordt het ammonium eerst omgezet tot nitriet, dat vervolgens wordt omgezet tot stikstof. Bij de omzettingen van nitraat tot stikstof en van nitriet tot stikstof treden het nitraat en het nitriet als oxidator op. Voor deze reacties is een reductor (koolstofbron) nodig; vaak wordt daar methanol voor gebruikt.

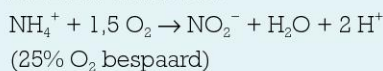
Op de website van het Energie- en Milieu-informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest wordt de klassieke methode voor de verwijdering van ammonium uit afvalwater vergeleken met het SHARON-proces. Een gedeelte van de tekst van deze website is als tekstfragment hieronder weergegeven.

Het SHARON-proces is bedoeld om stikstof te verminderen van bijvoorbeeld 1000 naar 100 mg L⁻¹, niet om volledige stikstofverwijdering te bekomen. Het SHARON-proces stimuleert nitrificatie tot nitriet in plaats van tot nitraat. Dit betekent een besparing op de zuurstofbehoefte van 25%. Daarnaast vereist de denitrificatie van nitriet 40% minder koolstofbron dan de denitrificatie van nitraat. De reacties die optreden zijn:

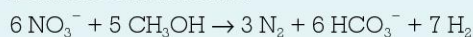
Klassieke nitrificatie:



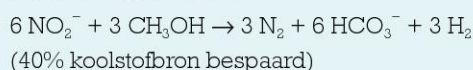
SHARON-nitrificatie:



Klassieke denitrificatie:



SHARON-denitrificatie:



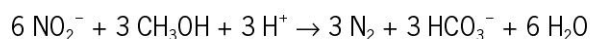
Het SHARON-systeem bestaat uit één reactor met daarin een beluchte fase (dus met zuurstof) en een fase zonder zuurstof waaraan methanol wordt toegevoegd. In de aerobe fase is een hoge zuurstofconcentratie vereist voor nitrificatieactiviteit. Nitrificatie is een verzurend proces en zodra een kritische pH-waarde wordt bereikt, dient de denitrificatie te worden gestart om de pH te corrigeren. Dit gebeurt door in de zuurstofloze fase dan methanol toe te voegen.

- a** Bereken hoeveel dm³ zuurstof (298 K, $p = p_0$) per liter afvalwater in het SHARON-proces nodig is om de genoemde vermindering van het stikstofgehalte te bewerkstelligen. Ga ervan uit dat ammoniumionen de enige stikstof bevattende deeltjes in het afvalwater zijn.

Zowel de nitrificatiereacties als de denitrificatiereacties zijn redoxreacties. In de nitrificatiereacties treedt het NH₄⁺ als reductor op.

- b** Geef de vergelijking van de halfreactie van NH₄⁺ in de nitrificatie die bij het SHARON-proces optreedt. In deze vergelijking komen onder andere ook H₂O en H⁺ voor.

De gegeven reactievergelijkingen voor de denitrificaties bevatten meerdere fouten. Zo staat er bijvoorbeeld ten onrechte dat er waterstof ontstaat. Dit moet water zijn. De andere formules in de reactievergelijkingen staan er wel terecht. De genoemde besparing van 40% op de koolstofbron die met het SHARON-proces kan worden verkregen, is wel juist. In het tekstfragment had voor de denitrificatie in het SHARON-proces het volgende moeten staan:



- c** Geef de reactievergelijking van de denitrificatie die in het klassieke proces plaatsvindt. In deze reactievergelijking komt ook H⁺ voor.

Bron: CE wvo 2008-I

Experimenten

11.8 De halfreactie van het jodaation

Je onderzoekt hoe het jodaation reageert.

11.9 Alcoholen als reductor

Welke alcoholen kunnen reageren met een oxidator?

11.10 Bepaling molariteit van ijzer(II)-oplossing

De molariteit van een ijzer(II)nitraatoplossing wordt bepaald met behulp van een aangezuurde kaliumpermanganaatoplossing.

11.11 Bepaling sulfietgehalte in witte wijn

Met behulp van een redoxtitratie wordt gecontroleerd of een witte wijn voldoet aan de sulfietnorm.

11.12 Bepaling vitamine C-gehalte in tabletten

Van een vitamine C-tablet wordt het gehalte aan vitamine C bepaald.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- van alcoholen als reductor de halfreacties opstellen;
- berekeningen uitvoeren aan redoxtitraties.

Afsluiting

Oefenopdrachten

- 1 Stel met behulp van Binas tabel 48 de halfreacties en de totaalreactie op voor elk van de redoxreacties die kunnen verlopen als de volgende (oplossingen van) stoffen bij elkaar worden gevoegd. Geef ook aan of er sprake is van een aflopende reactie of een evenwichtsreactie.
- a Een aangezuurde KClO_3 -oplossing wordt gevoegd bij een Na_2SO_3 -oplossing.
 - b Een aangezuurde $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ -oplossing wordt gevoegd bij een KI -oplossing.
 - c Chloorwater wordt gevoegd bij een $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -oplossing.
 - d Joodwater wordt toegevoegd aan een $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ -oplossing.

- 2 De stof ijzer(III)jodide komt niet voor in Binas tabel 45. Leg uit aan de hand van een volledige reactievergelijking waarom de stof niet bestaat. Maak hierbij gebruik van halfreacties en ga na of de reactie afloopt.

- 3 Stel de halfreacties en de totaalreactie op van de redoxreacties die kunnen optreden als de volgende (oplossingen van) stoffen worden samengevoegd. Vermeld steeds of de reactie kan verlopen en zo ja of het gaat om een aflopende reactie of een evenwichtsreactie.
- a Je leidt zwaveldioxidegas (figuur 11.37) in broomwater.
 - b Je dompelt een staafje kobalt in een oplossing van tin(II)nitraat.
 - c Je voegt een oxaalzuuroplossing toe aan een aangezuurde oplossing van kaliumpermanganaat (oxaalzuur = ethaandizuur).
 - d Je brengt stukjes koperfolie in contact met verdund salpeterzuur. Er ontstaat onder andere stikstofmono-oxide.



11.37 In de ondergaande zon ziet de uitstoot van zwaveldioxide door Chinese elektriciteitscentrales er zo uit.

- 4 Sjaak krijgt van zijn docent twee reageerbuizen met daarin een van de volgende twee vloeistoffen:
- propaan-2-ol
 - 2-methylpropaan-2-ol
- Hij weet niet welke stof in welk buisje zit en moet daar achter zien te komen door gebruik te maken van een aangezuurde oplossing van kaliumpermanganaat (KMnO_4).
- a Leg uit wat Sjaak moet doen om dit te weten te komen.
 - b Geef bij je uitleg van de reacties die verlopen de reactievergelijkingen. Gebruik molecuulformules.
- 5 Je kunt niet altijd een halfreactie uit Binas tabel 48 gebruiken. Soms zijn de omstandigheden (temperatuur, concentratie) anders dan de tabel aangeeft. Je kunt dan zelf een vergelijking afleiden door de juiste deeltjes te kiezen.
- Je leidt chloorgas door warme kaliloog. Na de reactie zijn chloride- en chloraationen aanwezig. Leid de halfreacties af en stel de totaalreactie op.
- 6 **Zilver**
- In de aardkorst komt het mineraal argentiet, Ag_2S , voor. Hieruit kan zilver (figuur 11.38) worden gewonnen. Bij de winning van zilver uit argentiet wordt een oplossing van natriumcyanide (NaCN) gebruikt. In deze oplossing van het natriumcyanide bevinden zich Na^+ -ionen en CN^- -ionen.



11.38 Voor spiegels van zeer hoge kwaliteit zoals nodig is in telescopen en camera's wordt nog steeds zilver gebruikt vanwege de bijzonder goede licht reflecterende eigenschappen.

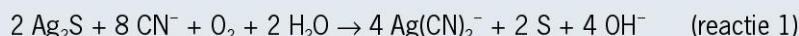
Het volgende evenwicht heeft zich ingesteld:



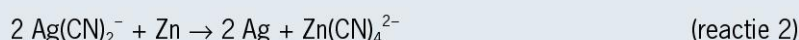
Waterstofcyanide (HCN) is giftig. De [HCN] in de oplossing moet daarom klein zijn. Dat wordt bereikt door de pH van de natriumcyanide-oplossing op een bepaalde waarde te brengen met behulp van natronloog.

- a** Wanneer is de [HCN] in de oplossing het kleinst: als de pH op 11 wordt gebracht of als de pH op 12 wordt gebracht? Licht je antwoord toe.

Bij de winning van zilver wordt het gesteente dat argentiet bevat, fijngemalen en gemengd met de natriumcyanide-oplossing. Er ontstaat een suspensie. Door deze suspensie wordt lucht geleid. Hierbij treedt de volgende reactie op:



De suspensie wordt gefiltreerd. Het filtraat wordt met een overmaat zinkpoeder geroerd. De volgende reactie treedt op:



Aangenomen mag worden dat zowel in het deeltje $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ als in het deeltje $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ cyanide-ionen voorkomen.

- b** Leg mede aan de hand van formules van deeltjes in de vergelijkingen van reactie 1 en reactie 2 uit of het om redoxreacties gaat of niet. Noteer je antwoord door in elk van onderstaande zinnen een keuze voor 'wel' of 'niet' te maken en de zinnen af te maken.
 Reactie 1 is wel / niet een redoxreactie, want ...
 Reactie 2 is wel / niet een redoxreactie, want ...

Het ontstane zilver wordt samen met de overmaat zinkpoeder door filtratie afgescheiden. Het residu is een mengsel van zilver en zink. Hieruit wordt het zilver verkregen door zoutzuur toe te voegen. Dan reageert zink wel en zilver niet. Bij deze reactie ontstaat onder andere waterstof.

- c** Geef de vergelijking van de reactie die plaatsvindt wanneer zoutzuur aan het mengsel van zink en zilver wordt toegevoegd.

Naar: CE vwo 2007-II



Voor witte verf wordt vaak titaan(IV)oxide (TiO_2) als pigment gebruikt. Deze stof wordt bereid uit het erts ilmeniet. Ilmeniet is van oorsprong ijzer(II)titanaat (FeTiO_3). In de loop van de tijd heeft echter een deel van het ijzer(II)titanaat met zuurstof uit de lucht gereageerd. Door deze reactie bestaat het erts behalve uit ijzer(II)titanaat ook uit ijzer(III)titanaat ($\text{Fe}_2(\text{TiO}_3)_3$) en ijzer(III)oxide (Fe_2O_3).

- a** Leg uit waarin het massapercentage titaan het hoogst is: in zuiver ijzer(II)titanaat of in erts waarvan een deel van het ijzer(II)titanaat met zuurstof heeft gereageerd.

Bij de bereiding van titaan(IV)oxide laat men het erts eerst reageren met een zwavelzuur-oplossing. Hierbij treden reacties op waarbij onder andere TiO_3^{2-} wordt omgezet tot TiO^{2+} . Door een reactie met water wordt vervolgens TiO^{2+} omgezet tot TiO_2 . Deze laatste reactie is geen redoxreactie.

- b** Geef de vergelijking van de reactie van TiO^{2+} met water onder vorming van onder andere TiO_2 .

11.39 TiO_2 heeft als E-nummer E171. Het wordt onder andere toegevoegd aan kauwgum en tandpasta.

In de oplossing die ontstaat nadat de zwavelzuuroplossing is toegevoegd, komen ook Fe^{3+} -ionen voor. Voor het verkrijgen van het witte pigment is de aanwezigheid van geel Fe^{3+} ongewenst. Daarom wordt Fe^{3+} verwijderd voordat water wordt toegevoegd. Dit gebeurt door toevoeging van een overmaat ijzer (Fe). Bij de reactie tussen Fe^{3+} en Fe ontstaat Fe^{2+} . Door het toegevoegde ijzer wordt ook een klein deel van het TiO^{2+} omgezet tot Ti^{3+} .

c Geef de vergelijking van de halfreactie voor de omzetting van TiO^{2+} (in zuur milieu) tot Ti^{3+} .

Voor deze halfreactie geldt $V_0 = +0,06 \text{ V}$. Het ontstane Ti^{3+} verhindert dat na verwijdering van het overgebleven Fe, het Fe^{2+} door opgeloste zuurstof weer wordt omgezet tot Fe^{3+} .

d Geef hiervoor een verklaring aan de hand van bovenstaande gegevens en een gegeven uit Binas.

Naar: CE vwo 2005-I

8 Goudwinning

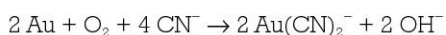
Goud komt in de natuur samen met zilver voor in gesteenten, het zogenoemde gouderts. Uit dit erts wordt goud gewonnen (figuur 11.40). De twee tekstfragmenten in deze opgave gaan over dit proces.



11.40 Goudmijnen in arme landen zijn vaak onbeschermd tegen giftige hulpstoffen zoals cyanide of in deze goudmijn kwik.

Goudwinning (1)

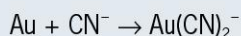
Bij het cyanideproces vermengt men fijn gemalen gouderts met een natriumcyanide-oplossing. Het goud, evenals zilver, reageert met deze oplossing en met zuurstof volgens de reactievergelijking:



De reactie verloopt volledig en snel naar rechts. In de praktijk roert men het ertsconcentraat in een natriumcyanide-oplossing waar lucht door borrelt. Als de edelmetalen zijn opgelost, filtreert men het gesteente af.

Naar: Het Digitale Archief III, cd-rom Natuur & Techniek 1999

De reactievergelijking in tekstfragment 1 is fout. De correcte vergelijking kun je afleiden onder andere met behulp van het gegeven dat deze reactie een redoxreactie is. De vergelijking van de halfreactie van het goud is hieronder gedeeltelijk weergegeven:



De andere halfreactie is die van zuurstof in niet-zuur milieu.

a Maak de hierboven gegeven onvolledige vergelijking van de halfreactie van het goud af.

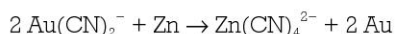
b Leid met behulp van de vergelijkingen van de halfreacties de correcte vergelijking af van de reactie die wordt bedoeld in tekstfragment 1.



11.41 Met genoeg geld kun je zelfs een gouden Lamborghini kopen.

Goudwinning (2)

Het goud in oplossing wordt teruggewonnen door reductie met zinkpoeder:



Het goud slaat neer en bevat meestal nog aanzienlijke hoeveelheden zilver. De legering wordt gesmolten, in staven gegoten en naar de raffinaderij getransporteerd. In deze raffinaderij smelt men de legering, waarna men er chloorgas doorheen blaast. Zilver vormt daarbij zilverchloride dat op het gesmolten metaal komt drijven. Als het zilveragehalte tot beneden 0,4% is gedaald, beëindigt men het chloreren, schept het zilverchloride van de vloeistof af, en giet daarna het goud in staven van 12,50 kg. Ze zijn voor de verkoop gereed, de zuiverheid is 99,6 massa-%.

De grondstof voor de raffinaderij is ruw goud met 90,0 massa-% goud en 10,0 massa-% zilver.

- c** Bereken hoeveel dm^3 chloorgas ($T = 298 \text{ K}$, $p = p_0$) nodig is voor de productie van een staaf goud van 12,50 kg met 99,6 massa-% goud, uit de grondstof met 90,0 massa-% goud en 10,0 massa-% zilver.

Naar: CE vwo 2007-I

- 9** De V_0 van O_2 in water is sterk afhankelijk van de pH. In oplossingen met pH-waarden van 0,00, 7,00 en 14,00 bedraagt de V_0 -waarde respectievelijk 1,23 V, 0,82 V en 0,40 V (bij $T = 298 \text{ K}$ en $p = p_0$).

Opgelost zuurstof speelt een belangrijke rol bij het roesten van ijzer (figuur 11.42). Dit gebeurt alleen onder bepaalde omstandigheden:

- 1 In zuiver water roest ijzer niet.
- 2 In (neutraal) water met opgelost zuurstof roest ijzer wel.
- 3 In water met $\text{pH} < 7$ waarin zuurstof is opgelost, roest ijzer eveneens.

- a** Verklaar waarom ijzer in geval 1 niet wordt aangetast.

Zowel in geval 2 als in geval 3 reageert ijzer in eerste instantie tot $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$.

- b** Geef van geval 2 en 3 de reactievergelijkingen.

In geval 3 wordt het gevormde $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ in een tweede redoxreactie omgezet tot $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$. In geval 2 treedt die reactie maar heel gedeeltelijk op.

- c** Geef hiervoor een verklaring.

- d** Geef de reactievergelijking voor de vorming van $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$ uit $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ in zuurstof bevattend water met $\text{pH} 7$.



11.42 In zeewater roest ijzer heel snel zoals hier de met roest bedekte motor van een vliegtuigwrak in zee.

10 Wat is er mis aan spinazie met vis?

Onderstaand tekstfragment is ontleend aan de website van het Voedingscentrum.

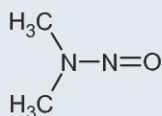
Nitraat en nitriet

Nitraat is een stof die van nature in drinkwater en groente voorkomt. Het is nauwelijks schadelijk voor mensen. Door het bewaren, bereiden of het eten van groente wordt nitraat gedeeltelijk omgezet in nitriet. Nitriet kan de beschikbaarheid van zuurstof in het bloed verminderen. Het advies is volop groente te eten, maar niet vaker dan twee keer per week nitraatrijke groenten.

Ook moet nitraatrijke groente, zoals spinazie, niet samen met vis, schaal- of schelpdieren worden gegeten (figuur 11.43). Dit voorkomt de vorming van mogelijk mutagene nitrosamines in het lichaam.

- a** Leg uit wat voor soort deeltje nodig is voor de omzetting van nitraat tot nitriet. Maak een keuze uit: base, oxidator, reductor en zuur.

Nitrosamines worden gekenmerkt door de aanwezigheid van de groep $\text{N}=\text{O}$ in de moleculen. Een voorbeeld van een nitrosamine is N-nitrosodimethylamine:



11.43 Spinazie met vis? Toch zijn er talloze recepten van te vinden.

Moleculen N-nitrosodimethylamine kunnen ontstaan uit moleculen dimethylamine en zogenoemde nitrosylionen: NO^+ . Behalve moleculen N-nitrosodimethylamine ontstaat nog een ander soort deeltjes. Dimethylamine is een stof die in vis en schaal- en schelpdieren voorkomt.

- b** Geef de vergelijking van de reactie tussen moleculen dimethylamine en nitrosylionen. Gebruik structuurformules voor de organische stoffen.

Nitrosylionen ontstaan wanneer nitriet in zuur milieu, bijvoorbeeld in de maag, terechtkomt. Behalve NO^+ ontstaat één andere stof.

- c** Geef de reactievergelijking voor de vorming van NO^+ uit nitriet in zuur milieu.

Naar: CE vwo 2011-I

Keuzeopdrachten

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

1 Corrosie

IJzer, staal en ook sommige keramische materialen kampen met corrosie. Denk maar aan roestende fietsen en ingestorte bruggen. In deze opdracht onderzoek je welke chemie achter corrosie zit, wat de gevaren van corrosie zijn en hoe je corrosie kunt voorkomen.

2 Vuurwerk

Elk jaar met oud en nieuw gaat er voor veel geld de lucht in en genieten we van al die knallen en mooie vuurpijlen. Als je wilt weten wat deze keuzeopdracht precies inhoudt, moet je op de site kijken.

Overzicht begrippen

Edelheid van metalen	De edelheid van metalen kun je afleiden uit de waarde van de standaardelektrodepotentiaal. Hoe hoger de waarde van de standaardelektrodepotentiaal, hoe sterker het metaal als oxidator en hoe edeler het metaal.
Geconjugeerde oxidator	Het deeltje dat ontstaat na de reactie van een reductor.
Geconjugeerde reductor	Het deeltje dat ontstaat na de reactie van een oxidator.
Halfreactie	Een halfreactie geeft de helft van een totaalreactie van een redoxreactie weer. In de halfreactie staan elektronen die ontstaan of voor de reactie nodig zijn. De totaalreactie wordt samengesteld door de halfreacties van de oxidator en reductor op te tellen.
Oxidator	Een deeltje dat elektronen opneemt.
Redoxkoppel	Een redoxkoppel is een oxidator en zijn geconjugeerde reductor of een reductor en zijn geconjugeerde oxidator .
Redoxreactie	Een reactie waarbij een elektronenoverdracht plaatsvindt.
Redoxtitratie	Kwantitatieve analysemethode om bijvoorbeeld gehalten te bepalen. Alle oxidatordeeltjes hebben in het equivalentiepunt gereageerd met reductordeeltjes.
Reductor	Een deeltje dat elektronen afstaat.
Standaardelektrodepotentiaal	Elk redoxkoppel heeft een standaardelektrodepotentiaal V_0. Hoe hoger de waarde van V_0, hoe sterker de oxidator en hoe zwakker de reductor. Een redoxreactie is: • een aflopende reactie als $\Delta V_0 = V_0(\text{ox}) - V_0(\text{red}) \geq 0,3 \text{ V}$ • een evenwichtsreactie als $-0,3 \text{ V} < \Delta V_0 < 0,3 \text{ V}$ • verloopt niet als $\Delta V_0 \leq -0,3 \text{ V}$
Stappenplan halfreactie	1 Noteer de gegeven deeltjes. 2 Stel de halfreactie van de deeltjes op. Zuur milieu: voor de pijl H^+ en eventueel H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag geen OH^- ontstaan. Basisch milieu: voor de pijl OH^- en eventueel H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag geen H^+ ontstaan. Neutraal milieu: voor de pijl H_2O als hulpdeeltje, na de pijl mag H^+ of OH^- ontstaan. 3 Maak de deeltjes in de halfreactie kloppend. 4 Maak de lading in de halfreactie kloppend door het juiste aantal elektronen (e^-) toe te voegen.
Stappenplan redoxreactie	1 Inventariseer welke deeltjes er zijn. 2 Wat is de sterkste oxidator en wat is de sterkste reductor? 3 Verloopt de reactie? 4 Stel de halfreacties en de totaalreactie op. 5 Controle

12 Molecuulbouw

Inhoud

12.1 Lewisstructuren

12.2 VSEPR-theorie

12.3 Mesomerie

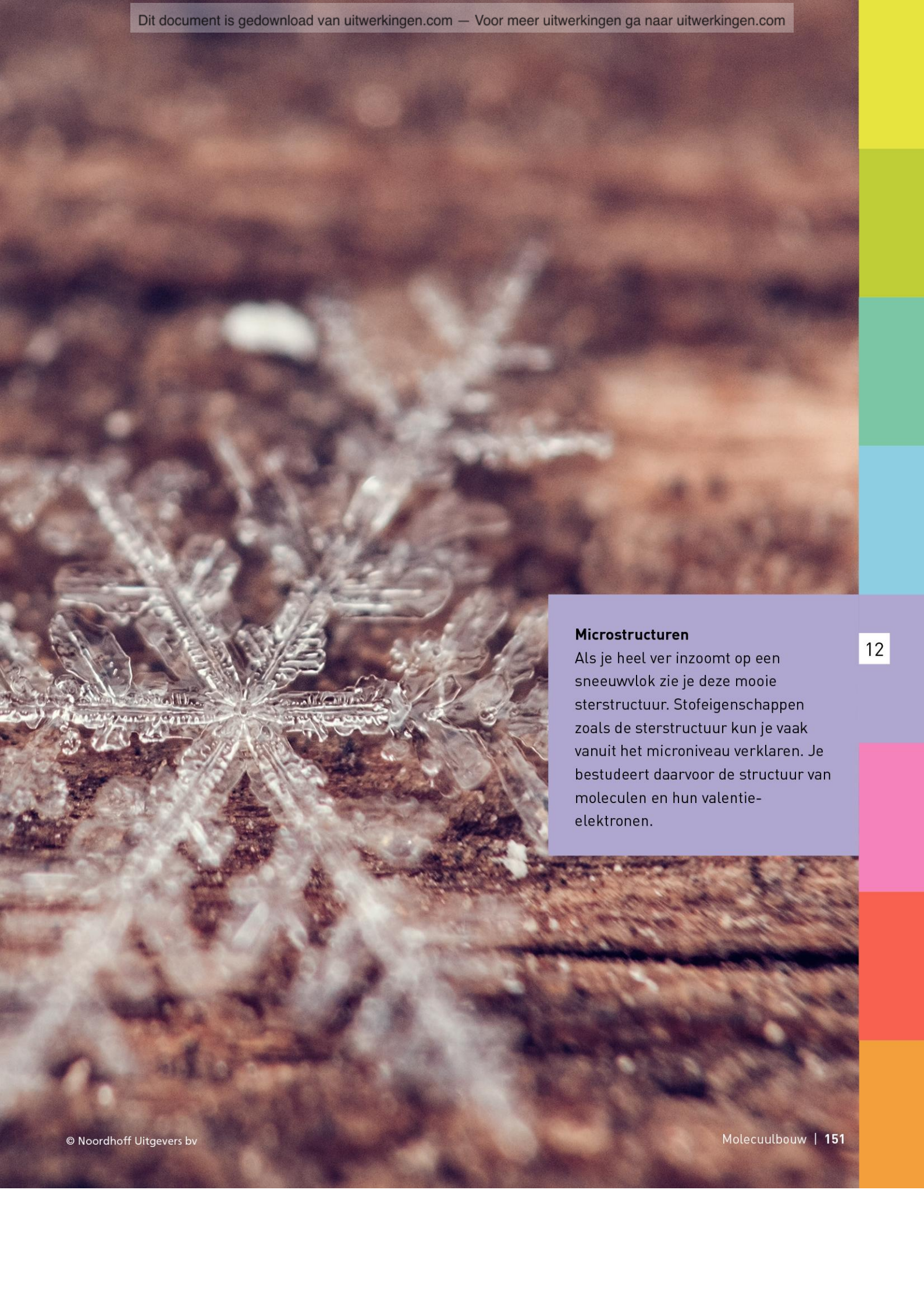
12.4 Reactiemechanismen

12.5 Stereo-isomerie
Experimenten:
12.1 *Cis-trans*-isomerie
12.2 Spiegelbeeldisomeren
12.3 Polaroid
12.4 Polarimeter

Afsluiting

Overzicht begrippen





Microstructuren

Als je heel ver inzoomt op een sneeuwvlok zie je deze mooie sterstructuur. Stofeigenschappen zoals de sterstructuur kun je vaak vanuit het microniveau verklaren. Je bestudeert daarvoor de structuur van moleculen en hun valentie-elektronen.

12

Ozon

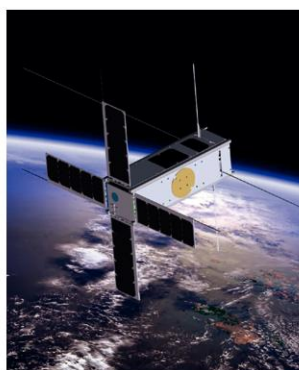
Bij de kweek van sommige vissoorten produceren de vissen een feromoon. Dit feromoon vertraagt de groei van de vissen, een ongewenste situatie in een viskwekerij. Ozon is één van de weinige middelen die veilig kan worden ingezet om deze feromonen te verwijderen en om de groei van de vissen te optimaliseren.



Je leert

- wat een lewisstructuur is;
- hoe je de lewisstructuur kunt opstellen van moleculen, ionen en radicalen.

12.1 Lewisstructuren



12.1 Dit minisatellietje van $30 \times 10 \times 10$ cm brengt de ozonlaag en de stratosfeer in beeld.

Lewisstructuren

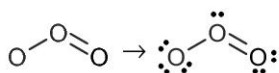
Ozon, O_3 , is een gas dat in de lagere atmosfeer vrijwel niet voorkomt (figuur 12.1). In een viskwekerij wordt ozon geproduceerd in ozongeneratoren. Onder invloed van elektriciteit wordt de zuurstof in een luchtstroom voor een deel omgezet in ozon. Als je de structuurformule van een ozonmolecuul probeert te tekenen, is er iets vreemds aan de hand.

In klas 4 heb je geleerd dat volgens de **octetregel** atomen bindingen met elkaar vormen, zodat ze een **edelgasconfiguratie** krijgen, wat inhoudt dat elk atoom acht **valentie-elektronen** heeft. Met behulp van de octetregel kun je onder andere voorspellen hoeveel bindingen niet-metaal-atomen aangaan. Een zuurstofatoom heeft bijvoorbeeld zes valentie-elektronen. Door twee elektronen met andere atomen te delen, kan hij voldoen aan de octetregel. Een zuurstofatoom gaat daarom twee atoombindingen aan. Je zegt dat de **covalentie** van zuurstof twee is (figuur 12.2).

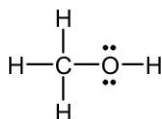
Er zijn echter veel voorbeelden te geven van moleculen waarbij deze covalentie niet klopt. Het ozonmolecuul hieronder is zo'n voorbeeld. Toch voldoen alle zuurstofatomen in een ozonmolecuul wel aan de octetregel. Dat is pas zichtbaar als je ook alle valentie-elektronen in de structuurformule aangeeft. Elk atoom is dan omringd door acht elektronen:



12.2 Volgens de covalentie gaat een O-atoom twee bindingen aan zoals in water en zuurstof.



Als je in de structuurformule van een molecuul alle valentie-elektronen tekent, krijg je de **lewisstructuur**. Je ziet in de structuur hierboven dat de elektronen in tweetallen voorkomen, dit heet een **elektronenpaar**.



a



b

12.3 De lewisstructuur van een methanolmolecuul (a) en van een stikstofmolecuul (b)



12.4 Stikstofbowl voor koken met vloeibare stikstof ($T < 77\text{ K}$). Dit maakt onderdeel uit van het nieuwe moleculaire koken.

Het gemeenschappelijke elektronenpaar van een atoombinding, het **bindend elektronenpaar**, geef je in de lewisstructuur weer met een streepje. Alle overige valentie-elektronen, de **niet-bindende** of **vrije elektronenparen**, geef je weer als groepjes van twee stippen om het atoom heen, zie figuur 12.3.

Volgens de octetregel moet elk atoom dan vier elektronenparen om zich heen hebben. Het waterstofatoom is hierop een uitzondering. Dit atoom wordt altijd omringd door één elektronenpaar, waardoor het dezelfde configuratie heeft als het edelgas helium.

Bij het opstellen van de lewisstructuur gebruik je het aantal valentie-elektronen van elk atoom en de octetregel, zie het voorbeeld hieronder.

Voorbeeld 1

Teken de lewisstructuur van een fluormolecuul.

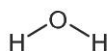
In Binas tabel 99 zie je dat elk fluoratoom zeven valentie-elektronen heeft. Eén van die elektronen is beschikbaar voor de atoombinding met het andere atoom. Dit bindend elektronenpaar wordt weergegeven door één streepje tussen de atomen. In de lewisstructuur voldoet elk fluoratoom aan de octetregel, want het heeft acht elektronen om zich heen: twee in het bindend elektronenpaar en zes in de drie vrije elektronenparen. De lewisstructuur wordt:



Lewisstructuren opstellen

Om zelf een lewisstructuur op te stellen volg je onderstaand stappenplan. Het is uitgewerkt aan de hand van het watermolecuul.

Stap 1: Teken de structuurformule waarbij je zo veel mogelijk rekening houdt met de covalentie zoals je dat hebt geleerd in klas 4, zie tabel 12.5.



Stap 2: Zoek in Binas tabel 99 op hoeveel valentie-elektronen elk atoom heeft en hoeveel er nodig zijn voor een octet.

covalentie			
4	3	2	1
C	N	O	F
	P	S	Cl
		Se	Br
			I
			H

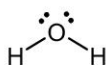
12.5 Covalenties van niet-metalen

atoom	valentie-elektronen	nodig voor octet	aantal bindingen
O	6	2	2
H	1	1	1

Stap 3: Bepaal hoeveel valentie-elektronen zijn gebruikt in de bindende elektronenparen en hoeveel valentie-elektronen over zijn.

Bij de H-atomen is één valentie-elektron gebruikt in het bindende elektronenpaar. Er zijn geen valentie-elektronen over. Bij het O-atoom zijn twee valentie-elektronen gebruikt in de bindende elektronenparen. Er zijn dus $6 - 2 = 4$ valentie-elektronen over.

Stap 4: Bereken het aantal vrije elektronenparen en geef de lewisstructuur van het molecuul. *Bij het O-atoom zijn vier valentie-elektronen over. Dat zijn $4 \div 2 = 2$ vrije elektronenparen. De lewisstructuur is:*





12.6 Vast CO_2 , droogijs genoemd, wordt gebruikt om bij luchttransporten producten koel te houden.

Voorbeeld 2

Stel de lewisstructuur op van koolstofdioxide, CO_2 (figuur 12.6).

Stap 1: De covalentie van koolstof is 4 en van zuurstof 2. De structuurformule wordt:

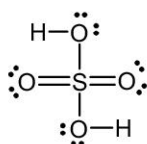
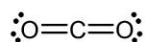


Stap 2: Het aantal valentie-elektronen is:

atoom	valentie-elektronen	nodig voor octet	aantal bindingen
O	6	2	2
C	4	4	4

Stap 3: Het koolstofatoom heeft vier valentie-elektronen gebruikt in vier bindende elektronenparen en voldoet al aan de octetregel. Bij beide O-atomen zijn twee valentie-elektronen gebruikt in de bindende elektronenparen. Er zijn dus $6 - 2 = 4$ valentie-elektronen over.

Stap 4: Bij de O-atomen zijn vier valentie-elektronen over. Dat zijn $4 \div 2 = 2$ vrije elektronenparen. De lewisstructuur is:



12.7 Het S-atoom in H_2SO_4 gaat zes bindingen aan.

Uitzonderingen op de octetregel

Er zijn behalve waterstof nog meer uitzonderingen op de octetregel. In sommige gevallen kan bij een centraal P-, N- of S-atoom het aantal omringende elektronen groter zijn dan acht. Je spreekt dan van een **uitgebreid octet**. In figuur 12.7 zie je de lewisstructuur van zwavelzuur. Het centrale zwavelatoom heeft zes bindingen en dus zes bindende elektronenparen, de covalentie van het zwavelatoom is hier 6. Het zwavelatoom heeft dus geen omringing van acht elektronen, maar een omringing van twaalf elektronen. De octetregel berust op het feit dat de edelgasconfiguratie een zeer stabiele elektronenconfiguratie is. Bij zwavelzuur zie je dat er ook andere elektronenconfiguraties zijn die een stabiele verbinding opleveren. Als je in opgaven een uitgebreid octet tegenkomt, wordt de covalentie van het centrale atoom in de opgave gegeven.



12.8 Dit dier voldoet ook aan de octetregel.



12.9 Een chloorradicaal

Lewisstructuren van radicalen

Een **radicaal** is een deeltje waarbij niet alle elektronen in paren voorkomen, maar er een ongepaard elektron voorkomt op een van de atomen (figuur 12.9). Door het ongepaarde elektron voldoet een radicaal niet aan de octetregel. Hierdoor reageert het snel met andere atomen, moleculen of radicalen, om zo alsnog aan de octetregel te voldoen.

Een voorbeeld van het opstellen van de lewisstructuur van een radicaal zie je hieronder.



12.10 Ook in de ruimte worden in donkere moleculaire wolken zoals de Paardekopnevel methoxyradicalen gevormd in extreem dunne ijslaagjes op interstellair stofdeeltjes.

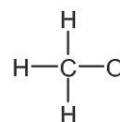


12.11 In je lichaam ontstaan ook radicalen bij bijvoorbeeld de verbranding van voedingsstoffen. Dat is normaal en niet te vermijden. In sommige voedingsstoffen zitten zogenaamde antioxidanten die deze radicalen kunnen neutraliseren.

Voorbeeld 3

Stel de lewisstructuur op van een methoxyradicaal, $\text{CH}_3\text{O}\cdot$ (figuur 12.10).

Stap 1: De covalentie van koolstof is 4, van waterstof 1 en van zuurstof 2. Het zuurstofatoom kan echter niet dubbelgebonden zijn, want dan voldoet koolstof niet meer aan de octetregel. Maak daarom bij soortgelijke formules het centrale atoom als eerste kloppend met de octetregel.



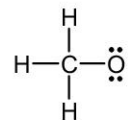
Stap 2: Het aantal valentie-elektronen is:

atoom	valentie-elektronen	nodig voor octet	aantal bindingen
O	6	2	2
C	4	4	4
H	1	1	1

Stap 3: Het koolstofatoom heeft vier valentie-elektronen gebruikt in vier bindende elektronenparen. Waterstof heeft één valentie-elektron in het bindende elektronenpaar gebruikt. Beide voldoen aan de octetregel.

Bij het O-atoom is één valentie-elektron in het bindend elektronenpaar gebruikt. Er zijn dus $6 - 1 = 5$ valentie-elektronen over.

Stap 4: Bij het O-atoom zijn vijf valentie-elektronen over. Dat zijn $5 \div 2 = 2,5$ vrije elektronenparen. Dat zijn dus twee vrije elektronenparen en een ongepaard elektron. De lewisstructuur is:



Lewisstructuur van een ion opstellen

Bij het opstellen van de lewisstructuur van een ion moet je vanaf stap 2 rekening houden met de lading van het ion. Bij ionen is er sprake van meer of juist minder elektronen dan je op basis van Binas tabel 99 bepaalt.

Bij negatief geladen ionen geeft de lading het aantal extra elektronen aan. Bij positief geladen ionen staat de lading juist voor het aantal elektronen dat er te weinig is. In de uiteindelijke lewisstructuur zet je rechte haken om het ion en de lading rechtsboven, zie voorbeeld 4.



a



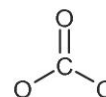
b

12.12 Als je inademt wordt er in je bloed CO_2 omgezet in koolzuur (a). Carbonaationen voorkomen dat je bloed te zuur wordt (b).

Voorbeeld 4

Stel de lewisstructuur op van het carbonaation, CO_3^{2-} (figuur 12.12).

Stap 1: De covalentie van koolstof is 4 en van zuurstof 2. Niet alle zuurstofatomen kunnen echter dubbelgebonden zijn, want dan voldoet koolstof niet meer aan de octetregel. Ook bij samengestelde ionen maak je het centrale atoom als eerste met de octetregel kloppend.



Stap 2: Het aantal valentie-elektronen staat hieronder, zuurstof staat er nu twee keer in. De lading geef je als extra rij aan.

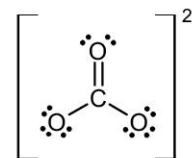
atoom	valentie-elektronen	nodig voor octet	aantal bindingen
O enkelgebonden	6	2	1
O dubbelgebonden	6	2	2
C	4	4	4
lading	2 extra		

Stap 3: Het koolstofatoom heeft vier valentie-elektronen in vier bindende elektronenparen gebruikt. Het voldoet aan de octetregel.

Bij het dubbelgebonden O-atoom zijn twee valentie-elektronen in de bindende elektronenparen gebruikt. Er zijn dus $6 - 2 = 4$ valentie-elektronen over.

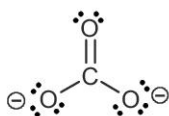
Bij de beide andere O-atomen is één valentie-elektron in het bindende elektronenpaar gebruikt. Er zijn dus $6 - 1 = 5$ valentie-elektronen over.

Stap 4: Bij het dubbelgebonden O-atoom zijn vier valentie-elektronen over. Dat zijn $4 \div 2 = 2$ vrije elektronenparen. Bij de enkelgebonden O-atomen zijn dat $5 \div 2 = 2,5$ vrije elektronenparen. Deze atomen krijgen echter vanwege de $2-$ lading van het ion beide een elektron extra. Elk O-atoom heeft dan drie vrije elektronenparen. De lewisstructuur is:



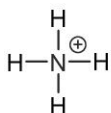
Formele lading

In een lewisstructuur blijken bij een atoom soms meer elektronen voor te komen dan het oorspronkelijke aantal valentie-elektronen. Hierdoor krijgt het atoom een lading, deze noem je de **formele lading**. Als bij een atoom meer elektronen voorkomen dan het oorspronkelijke aantal valentie-elektronen, dan is de formele lading negatief. Komen er juist minder elektronen voor dan het oorspronkelijke aantal valentie-elektronen, dan is de formele lading positief. Met het aantal elektronen bij een atoom bedoelen we het aantal elektronen in vrije elektronenparen plus een elektron voor elk bindend elektronenpaar rond dat atoom. In de tabel hieronder zie je dit uitgewerkt voor het carbonaation uit voorbeeld 4.



12.13

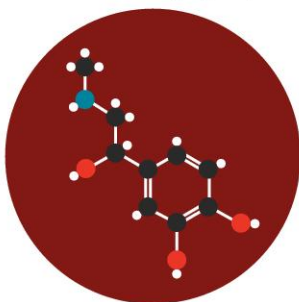
atoom	aantal elektronen bij het atoom	aantal valentie-elektronen
C	4	4
enkelgebonden O	7	6
dubbelgebonden O	6	6



12.14

Zoals je in de tabel op de vorige bladzijde kunt zien, komt bij de enkelgebonden O-atomen één elektron meer voor dan ze oorspronkelijk aan valentie-elektronen hadden. De formele lading van deze O-atomen is dan $1-$. Deze lading geef je in het ion omcirkeld aan, zie figuur 12.13. In een samengesteld ion is de som van de formele ladingen gelijk aan de totale lading van het ion. Als het aantal elektronen bij het atoom juist minder is dan het aantal valentie-elektronen, dan is de formele lading positief, zoals in figuur 12.14.

Formele ladingen komen niet alleen voor in samengestelde ionen, maar ook in moleculen en radicalen. De som van alle formele ladingen is bij neutrale moleculen echter 0. Een voorbeeld van een molecuul waarin formele ladingen voorkomen zie je in voorbeeld 5.

adrenaline $C_9H_{13}NO_3$ 

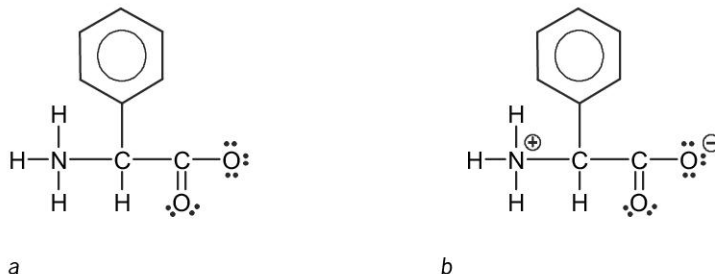
12.15 Adrenaline is een neurotransmitter, een signaalstof. Het wordt gemaakt uit onder andere fenylalanine.

Voorbeeld 5

Fenylalanine is een essentieel aminozuur in je lichaam. Een essentieel aminozuur is een aminozuur dat het lichaam niet zelf kan aanmaken en dat je dus via voeding moet opnemen. Het is onder andere nodig voor de aanmaak van neurotransmitters. Neurotransmitters zijn stoffen die in de hersenen signalen tussen zenuwcellen door kunnen geven (figuur 12.15).

Stel de lewisstructuur op van fenylalanine met en zonder formele ladingen.

De lewisstructuur van fenylalanine zie je in figuur 12.16a.



12.16 De lewisstructuur van fenylalanine zonder (a) en met formele lading (b)

Pas je dezelfde methode toe als bij het carbonaation hierboven, dan blijkt het N-atoom een formele lading van $1+$ te hebben. Het O-atoom heeft een formele lading van $1-$, zie figuur 12.16b. Het molecuul is dan neutraal. In het algemeen geldt: des te lager de formele ladingen, des te stabiel het molecuul of ion.

Samenvatting

- Een lewisstructuur is een structuurformule waarin naast de bindende ook de andere valentie-elektronen zijn aangegeven. Bij het opstellen van de lewisstructuur houd je rekening met de octetregel.
- Een radicaal is een deeltje waarbij op een van de atomen een ongepaard elektron voorkomt. Het voldoet daardoor niet aan de octetregel. Dit maakt een radicaal erg reactief.
- Bij het opstellen van de lewisstructuur van een ion houd je rekening met de lading van het ion. De lading van het ion wordt opgeteld bij of afgetrokken van het aantal valentie-elektronen.
- Bij het bepalen van de formele lading van atomen in een molecuul of samengesteld ion moet je het aantal elektronen bij het atoom vergelijken met het aantal valentie-elektronen uit Binas tabel 99.

Opdrachten

A 1

- Wat is de octetregel?
- Teken de structuurformule van propaan-1-ol.
- Waarom maakt C vier, H één en O twee atoombindingen?
- Wat stelt een bindingsstreepje in de structuurformule voor?
- Teken de lewisstructuur van propaan-1-ol.

B 2

Waterstofatomen zijn een uitzondering op de octetregel.

- Teken de lewisstructuur van de stof waterstof.
- Leg uit waarom waterstof een uitzondering is op de octetregel. Gebruik getallen in je antwoord.

B 3

Leg uit waarom de stof met molecuulformule CH_5 niet kan bestaan.

B 4

Leg uit welke van de onderstaande lewisstructuren de structuur van zuurstof is.



B 5

Geef de lewisstructuur van:

- methanal (CH_2O)
- het nitrietion (NO_2^-)
- het methylsulfideradicaal ($\text{CH}_3\text{S}\cdot$)

B 6

Geef de lewisstructuur van:

- hydrazine (N_2H_4)
- het hypochlorietion (ClO^-)
- het hypochlorietradicaal ($\text{ClO}\cdot$)

B 7

Geef de lewisstructuur van:

- methylethanoaat ($\text{CH}_3\text{COOCH}_3$)
- het methanoaation (HCOO^-)
- het methylbenzeenradicaal ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\cdot$)

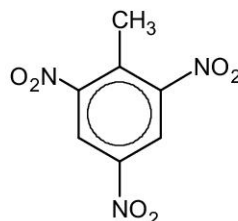
B 8

Bij volledige verbranding van aardgas (voornamelijk methaan, CH_4) zie je een blauwe vlam. Deze wordt veroorzaakt door C_2 -moleculen in de aangeslagen toestand.

- Teken de lewisstructuur van dit molecuul.
- Hoe komt het dat C_2 een zeer reactief deeltje is?

B 9

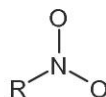
TNT staat bekend om zijn explosieve eigenschappen. Het wordt bijvoorbeeld gebruikt voor het vergruizen van rotsblokken in de mijnbouw. De structuurformule van TNT is hieronder weergegeven.



Een benzeenring met daaraan een CH_3 -groep heeft als naam 'tolueen'. De nummering van de ring begint dan bij de methylgroep. Een NO_2 -groep wordt aangegeven als 'nitro'.

- Geef de systematische naam van TNT.

De explosieve eigenschappen van TNT worden vooral veroorzaakt door de nitrogroepen. Hieronder zie je een onvolledige structuurformule van een nitrogroep.



- Neem de structuur over en vul deze aan tot een lewisstructuur. De R geeft de rest van de verbinding aan en mag je beschouwen als een H-atoom.

C 10

De allereerste organische verbinding die in een laboratorium werd gemaakt was ureum. Deze stof ontstond door ammoniumcyanaat te verhitten. Ammoniumcyanaat bestaat uit ammoniumionen, NH_4^+ , en cyanaationen, CNO^- .

- Geef de lewisstructuur van het ammoniumion en geef daarin de formele lading aan.

Voor de lewisstructuur van het cyanaation zijn drie mogelijkheden. Een met het stikstofatoom in het midden, een met het zuurstofatoom in het midden en een met het koolstofatoom in het midden.

- Teken de drie mogelijke lewisstructuren.

In het algemeen geldt dat de structuur met de minste formele ladingen de juiste is.

- c** Leg uit welke van de drie structuren de juiste lewisstructuur van het cyanaation is.

C 11

Met de vloeistof waterstofperoxide (H_2O_2) kun je je haren of tanden bleken, zie figuur 12.17. Waterstofperoxide wordt ook gebruikt als ontsmettingsmiddel van bijvoorbeeld de mond.

- a** Teken de lewisstructuur van waterstofperoxide.
b Bepaal van alle atomen de formele lading.



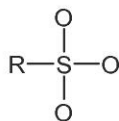
12.17 Met waterstofperoxide kun je haren bleken.

C 12

Natriumdodecylbenzeensulfonaten zijn verbindingen met de formule $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$. Bij het oplossen van zo'n verbinding ontstaan natriumionen en dodecylbenzeensulfonaationen.

- a** Geef de oplosvergelijking van het oplossen van een verbinding met de formule $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$.

De sulfonaatgroep (R-SO_3^-) in het dodecylbenzeensulfonaation is negatieve geladen en daardoor polair. Hieronder zie je een onvolledige structuurformule van een sulfonaatgroep.



- b** Neem de structuur over en vul deze aan tot een lewisstructuur. De covalentie van het S-atoom is 6. De R geeft de rest van de verbinding aan en mag je beschouwen als een H-atoom.

De dodecylgroep ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}$) is meestal onvertakt en is aan het vierde C-atoom gebonden aan de benzeenring. De dodecylgroep en de sulfonaatgroep zitten vaak tegengesteld aan elkaar gebonden aan de benzeenring.

- c** Geef de structuurformule van het dodecylbenzeensulfonaation.

Aangezien de dodecylbenzeengroep apolair van aard is, worden natriumdodecylbenzeensulfonaten vaak gebruikt in wasmiddelen en ontvetters.

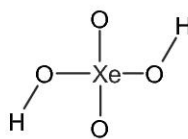
- d** Leg uit welke functie natriumdodecylbenzeensulfonaat in deze producten heeft.

C 13 ★

Dat de edelgasconfiguratie niet de enige stabiele elektronenconfiguratie is, blijkt uit het feit dat er ook verbindingen bestaan van edelgassen met andere atoomsoorten.

- a** Leg op basis van dit gegeven uit dat er ook andere stabiele elektronenconfiguraties bestaan.

Een voorbeeld van zo'n verbinding is xenonzuur, H_2XeO_4 . Het bestaan van deze verbinding is al in 1933 voorspeld door de Amerikaanse biochemicus Linus Pauling. Hieronder zie je een onvolledige structuurformule van xenonzuur.



- b** Neem de structuur over en vul deze aan tot een lewisstructuur. De covalentie van het Xe-atoom is 6.

Xenonzuur is in staat om één H^+ -ion af te staan, waarbij HXeO_4^- wordt gevormd. Het volledig geïoniseerde XeO_4^{2-} ion is nog nooit aangetoond.

- c** Geef de lewisstructuur van een HXeO_4^- ion.

Je kunt nu

- met het stappenplan een lewisstructuur opstellen van een molecuul, een samengesteld ion en van een radicaal;
- aan de hand van de lewisstructuur uitleggen waarom een radicaal erg reactief is;
- in een lewisstructuur de formele lading aangeven.

Vulkaanuitbarsting

Bij een vulkaanuitbarsting komen onder andere grote hoeveelheden zwaveldioxide en koolstofdioxide vrij. De moleculen van deze gassen bestaan allebei uit een centraal atoom gebonden aan twee zuurstofatomen. Toch is zwaveldioxide goed oplosbaar in water, terwijl dit niet geldt voor koolstofdioxide.



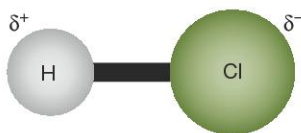
Je leert

- hoe je de ruimtelijke bouw van een molecuul kunt voorspellen;
- hoe je kunt voorspellen of moleculen dipolen zijn;
- welke soorten bindingen er in moleculaire stoffen voorkomen.

12.2 VSEPR-theorie



12.18 Vast CO_2 in water geeft een heftig proces. Het CO_2 dat gas wordt, lost niet op in water en kolkt uit de kolf.



12.19 De atoombinding in HCl is een polaire atoombinding.

Soorten bindingen

Het verschil in oplosbaarheid tussen zwaveldioxide en koolstofdioxide kun je verklaren aan de hand van de bindingen die moleculen van deze stoffen aangaan met watermoleculen (figuur 12.18). Een aantal soorten bindingen die voor kunnen komen bij moleculaire stoffen zijn al behandeld in klas 4, maar worden hieronder nog eens kort herhaald.

Polaire atoombinding

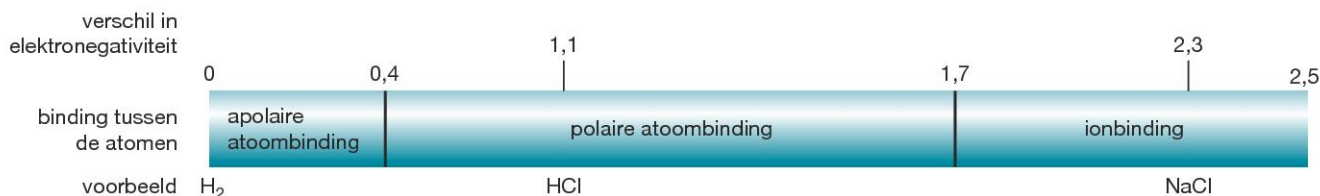
Bij sommige atoombindingen bevindt het bindende elektronenpaar zich dicht bij het ene dan bij het andere atoom. Dit treedt op wanneer er een verschil is in aantrekkingskracht op het elektronenpaar. De elektronegativiteit is een maat voor deze aantrekkingskracht. Hoe groter het verschil in elektronegativiteit, hoe dicht het elektronenpaar verschuift naar het atoom met de hoogste elektronegativiteit. Dit atoom wordt hierdoor een beetje negatief geladen (δ^-) en het andere atoom een beetje positief geladen (δ^+) (figuur 12.19). De atoombinding is dan een **polaire atoombinding**. De kleine lading die atomen met een polaire atoombinding hebben is de **partiële lading**.

In Binas tabel 40A staat van alle atoomsoorten de elektronegativiteit vermeld. Als het verschil in elektronegativiteit (ΔEN) van twee atomen tussen de 0,4 en 1,7 zit, is de atoombinding polair. Bij een verschil kleiner dan of gelijk aan 0,4 noem je de atoombinding apolair, zie figuur 12.20.

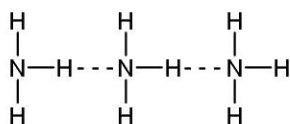
Vanderwaalsbinding

Niet alleen tussen atomen, maar ook tussen moleculen worden er onderling bindingen gevormd. Deze aantrekkingskracht heet de vanderwaalskracht. Door de vanderwaals-

kracht ontstaat een binding die je de **vanderwaalsbinding** noemt. De sterkte van de vanderwaalsbinding neemt toe bij een hogere molecuulmassa.



12.20 Het verschil in elektronegativiteit bepaalt het soort binding. Bij een groot verschil in elektronegativiteit worden er geen elektronen meer gedeeld, maar overgedragen. Er ontstaan dan ionen die bijeen worden gehouden door de ionbinding.



12.21 Waterstofbruggen tussen ammoniakmoleculen

Waterstofbruggen

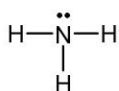
Tussen moleculen die OH- en/of NH-groepen bevatten treedt er naast de vanderwaalsbinding nog een extra binding op. De atoombinding in NH- of OH-groepen is een sterk polaire atoombinding, waarbij het N- of O-atoom een partiële negatieve lading krijgt en het H-atoom een partiële positieve lading. Een N- of O-atoom van het ene molecuul oefent hierdoor een aantrekkingskracht uit op een H-atoom van het andere molecuul. Deze binding heet de **waterstofbrug**, zie figuur 12.21. Stoffen waarvan de moleculen waterstofbruggen kunnen vormen, zijn doorgaans goed in water oplosbaar.

Ruimtelijke bouw

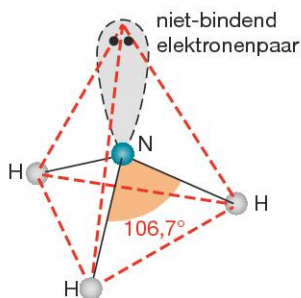
Zowel zwaveldioxide- als koolstofdioxidemoleculen bevatten geen OH- en/of NH-groepen. Je kunt daarmee het verschil in oplosbaarheid in water tussen de twee stoffen dus niet verklaren. Je moet op microniveau naar de ruimtelijke bouw van de moleculen kijken om een verklaring te vinden voor het verschil in oplosbaarheid.

De ruimtelijke bouw van moleculen kun je voorspellen met behulp van de lewisstructuur. Je maakt dan gebruik van het feit dat zowel bindende als vrije elektronenparen elkaar afstoten en dus zo ver mogelijk van elkaar af zitten. Deze methode heet VSEPR, de afkorting staat voor Valence-Shell Electron-Pair Repulsion.

Met de VSEPR-methode voorspel je de bouw van een molecuul door het **omringingsgetal** van het centrale atoom te bepalen. Het omringingsgetal is de som van het aantal atomen dat direct aan het centrale atoom is gebonden en het aantal vrije elektronenparen van het atoom. Het omringingsgetal van het centrale atoom kun je bepalen wanneer je de lewisstructuur van het molecuul hebt opgesteld.



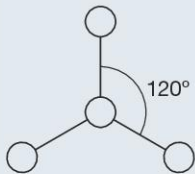
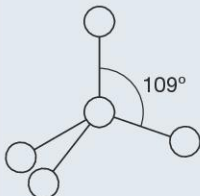
12.22 Lewisstructuur van NH₃



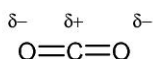
12.23 Ruimtelijke bouw van het ammoniakmolecuul

Neem bijvoorbeeld ammoniak, waarvan de lewisstructuur is weergegeven in figuur 12.22. Het centrale atoom is stikstof. Aan dit atoom zijn drie waterstofatomen gebonden en het heeft een vrij elektronenpaar. Het omringingsgetal is dus 4. De manier om vier elektronenparen zo ver mogelijk uit elkaar te houden is een tetraëdische structuur (zie figuur 12.23) met bindingshoeken van ongeveer 109°. De vier hoekpunten van deze tetraëder worden gevormd door het vrije elektronenpaar en de drie H-atomen.

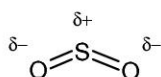
Met het omringingsgetal kun je in tabel 12.24 aflezen welke vorm het molecuul heeft en wat de bindingshoeken zijn. De werkelijke bindingshoek van ammoniak is 106,7°. Deze afwijking ontstaat doordat de vier elektronenparen niet gelijkwaardig zijn: vrije elektronenparen veroorzaken kennelijk een grotere afstoting dan bindende elektronenparen, zie figuur 12.23. De bindingshoeken in tabel 12.24 gelden dus alleen bij gelijkwaardige elektronenparen.

omringingsgetal	2	3	4
molecuulbouw	lineair	plat vlak	tetraëder
bindingshoeken			

12.24 Ruimtelijke bouw en ideale bindingshoeken van moleculen



a



b

12.25 Zowel in CO_2 als in SO_2 komen partiële ladingen voor.

Dipolen

Als je de VSEPR-theorie toepast op CO_2 en SO_2 vinden we de volgende ruimtelijke bouw:



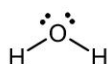
Door het vrije elektronenpaar is het omringingsgetal van zwaveldioxide 3. De vorm van het molecuul is dus een gelijkzijdige driehoek. De zwavelatomen hebben hierin een uitgebreid octet, omdat het zwavelatoom meer dan acht elektronen om zich heen heeft. Koolstofdioxidemoleculen hebben omringingsgetal 2 en zijn lineair.

Alle atoombindingen in beide moleculen zijn polair. Hierin hebben de zuurstofatomen een partiële negatieve lading (δ^-). Het zwavelatoom en het koolstofatoom hebben een partiële positieve lading (δ^+), zie figuur 12.25.

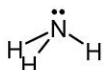
Moleculen die partiële ladingen bevatten en die een duidelijke positieve en negatieve kant hebben zijn dipoolmoleculen (ook wel **dipolen** genoemd). Dit geldt wel voor zwaveldioxide, maar niet voor koolstofdioxide. Bij koolstofdioxidemoleculen zijn er wel partiële ladingen, maar het centrum van positieve en negatieve lading valt in het molecuul samen en daarom is er geen duidelijke positieve en negatieve kant. Het zijn dus geen dipolen.

Doordat de zwaveldioxidemoleculen dipolen zijn, kunnen ze een **dipool-dipoolbinding** aangaan met watermoleculen, die ook dipolen zijn. De aanwezigheid van deze binding (microniveau) verhoogt de oplosbaarheid (macroniveau).

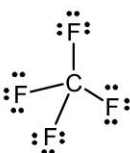
In figuur 12.26 zie je de ruimtelijke bouw van onder andere een water-, een ammoniak- en een tetrafluormethaanmolecuul. De moleculen van tetrafluormethaan bevatten ook partiële ladingen, maar er is geen duidelijke positieve en negatieve kant in het molecuul. Je zou kunnen zeggen dat de positieve lading de negatieve opheft. Deze moleculen zijn dus geen dipolen.



a



b



c

12.26 Ruimtelijke bouw van H_2O , NH_3 en CF_4

Samenvatting

- In moleculaire stoffen kunnen de volgende soorten bindingen voorkomen: (polaire) atoombinding in het molecuul en de vanderwaalsbinding, dipool-dipoolbinding en de waterstofbrug tussen moleculen.
- Met behulp van de VSEPR methode kun je de ruimtelijke bouw van moleculen voorspellen.
- Een molecuul met partiële ladingen en een duidelijke positieve en negatieve kant is een dipool. Aan de hand van de ruimtelijke bouw kun je voorspellen of een molecuul een dipool is. Dipolen kunnen onderling dipool-dipoolbindingen vormen.

Sleutelen aan moleculen

Levende wezens zitten vol met moleculaire motoren. Dit zijn moleculen of combinaties van moleculen die energie om kunnen zetten in een beweging. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het 'staartje' van een zaadcel, zodat deze zich kan voortbewegen in de richting van een eikel of denk aan de eiwitten myosine en actine die er samen voor zorgen dat je spieren zich samen kunnen trekken. De ruimtelijke bouw die wordt bepaald aan de hand van de lewisstructuur speelt een grote rol bij de functie van zo'n molecuul.

Door ontwikkelingen in de nanotechnologie zijn wetenschappers in staat om moleculen op atomair niveau te bewerken. De inspiratie voor de mogelijkheden van deze technologie halen ze voornamelijk uit de moleculaire motoren in levende wezens. Ze zijn als het ware 'de kunst aan het afkijken'. De eerste stap is vaak het verhelderen van de structuur van het molecuul. Als de ruimtelijke bouw van een moleculaire motor bekend is, kunnen ze deze reproduceren en waar nodig aanpassen.

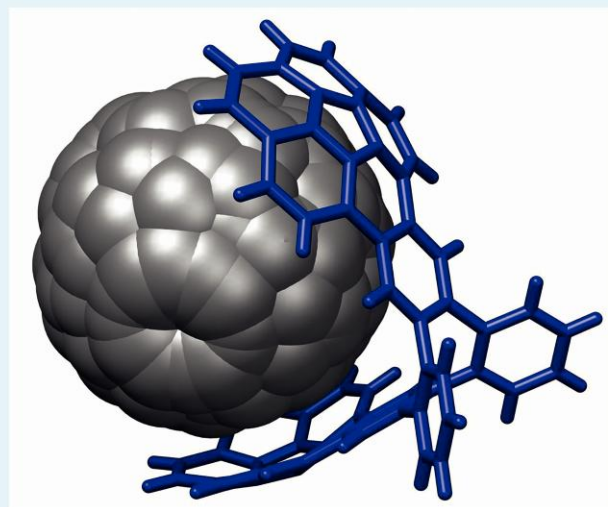
Een voorbeeld van een moleculaire machine is een molecuul dat werkt als schakelcontact (figuur 12.27). Het molecuul bestaat uit enkele ringvormen die zijn gebonden aan een oppervlak van goudatomen. Ringvormen zijn star, waardoor de schakelaar stevig op zijn plek blijft staan. De schakelaar zelf bestaat uit een langwerpig molecuul dat eindigt met een dipool. Door een speciale naald met op de punt een enkel geladen goudatoom in de buurt te brengen van de dipool kun je de schakelaar aan- en uitzetten.



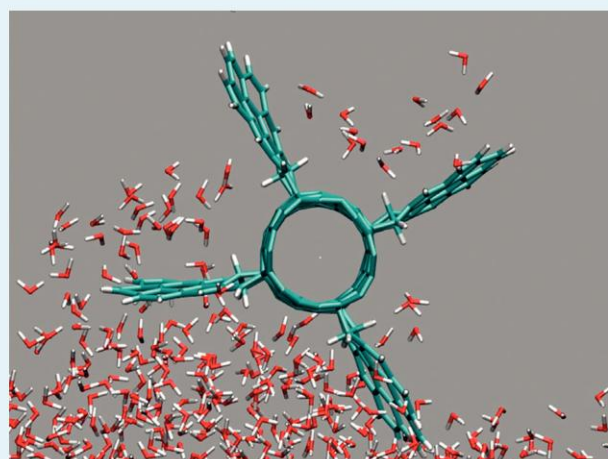
12.27 Model van een moleculaire schakelaar

Er zijn meer voorbeelden te noemen van moleculaire machines, zoals een tang op nanoschaal (figuur 12.28) en een nanopropellor (12.29). De atomen van deze machines zijn in een plat vlak gerangschikt. Je kunt daaruit afleiden dat het omringingsgetal van deze atomen 3 is.

Het praktisch nut van deze machines is in veel gevallen nog onduidelijk. De invloed van zulke kleine machines op het macroniveau dat wij waarnemen is beperkt. De Nederlandse Nobelprijswinnaar Ben Feringa vergelijkt de moleculaire machines echter met de uitvinding van het vliegtuig: daarvan zagen mensen in eerste instantie ook het nut niet in.



12.28 Model van een tang op nanoschaal



12.29 Model van een nanopropellor die watermoleculen voortstuwt

● Opdracht B19

Opdrachten

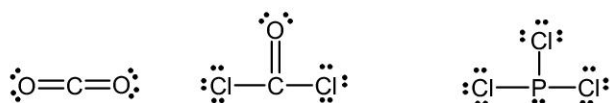
A 14

Gegeven de volgende bindingen: atoombinding, vanderwaalsbinding, dipool-dipoolbinding en waterstofbrug. Beantwoord voor elk van de bindingen de onderstaande vragen.

- Is er sprake van een binding tussen atomen of tussen moleculen?
- Hoe komt de binding tot stand?
- Bij welke soorten moleculen komt de binding voor?

B 15

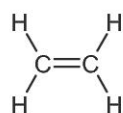
Onderstaand zijn de lewisstructuren van CO_2 , COCl_2 en PCl_3 gegeven.



- Bepaal voor elke verbinding het omringingsgetal van het centrale atoom.
- Voorspel met behulp van het omringingsgetal de ruimtelijke bouw van deze moleculen.

B 16

Hieronder is de structuurformule van etheen en van ethyn gegeven.



etheen



ethyn

Etheenmoleculen zijn vlak, ethynmoleculen zijn lineair. Leg uit waardoor dit de ruimtelijke bouw is.

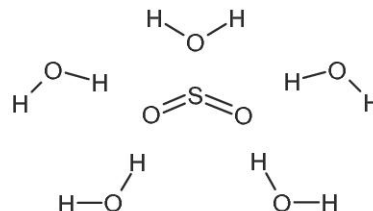
B 17

- Leg uit of moleculen van de volgende stoffen dipolen zijn.
 - koolstofdисульфide (CS_2)
 - waterstoffluoride (HF)
 - fosfortrichloride (PCl_3)
- Geef van elk van de stoffen bij vraag a aan of hij oplost in water.

B 18

- Geef de lewisstructuur van een SO_2 -molecuul. De covalentie van het S-atoom is hierbij 4 en dit atoom bevat nog één vrij elektronenpaar. In de structuur komen ook partiële ladingen voor. Geef deze aan in de lewisstructuur.

SO_2 -moleculen zijn goed oplosbaar in water, omdat er een dipool-dipoolbinding optreedt. Deze binding is zichtbaar in de onderstaande afbeelding.



De H_2O -moleculen zijn op een specifieke manier gerangschikt rond het SO_2 -molecuul, omdat er aantrekkende en afstotende krachten werken.

- Neem de bovenstaande figuur over en geef hierin de partiële ladingen aan.
- Leg uit welke aantrekkende en afstotende krachten ertoe leiden dat de H_2O -moleculen juist op deze manier het SO_2 -molecuul omringen.
- Leg uit of de oplosbaarheid van SO_2 in water verklaard wordt op micro- of op mesoniveau.

B 19

Lees de tekst in het kader 'Sleutelen aan moleculen' en beantwoord de onderstaande vragen.

De punt van de moleculaire schakelaar eindigt in een nitrilgroep ($\text{R}-\text{CN}$). De nitrilgroep is een dipool.

- Geef de lewisstructuur van de nitrilgroep. De R staat voor de rest van de verbinding en die mag je beschouwen als een H-atoom.
- Geef in de lewisstructuur ook partiële ladingen aan en leg uit dat de nitrilgroep inderdaad een dipool is.

Door een goud-ion in de buurt van de schakelaar te bewegen kun je de schakelaar aan- en uitzetten.

- Leg aan de hand van figuur 12.27 uit wat je met de lading van het goud-ion moet doen om te schakelen tussen 'aan' en 'uit'.

B 20

Voor de productie van een aantal organische verbindingen maakt men gebruik van natriumamide, NaNH_2 , opgelost in vloeibare ammoniak. Het natriumamide is in deze oplossing gesplitst in Na^+ ionen en NH_2^- ionen.

- Geef de lewisstructuur van het NH_2^- -ion. Plaats de formele negatieve lading in de lewisstructuur bij het juiste atoom.

- b** Leg met behulp van het omringingsgetal uit wat de ruimtelijke bouw van het amide-ion is.

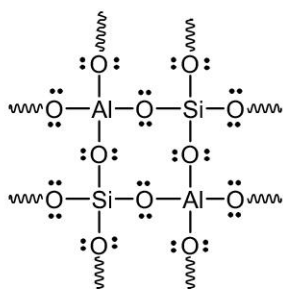
C 21

Het zout kaliumbromide heeft een kookpunt van 1708 K. Bijzonder aan deze verbinding is dat het in de gasfase moleculen vormt. Deze KBr-moleculen (g) zijn één van de sterkst bekende dipolen.

Leg uit waarom KBr (g) zo'n sterke dipool is.

C 22

Wasmiddelen bevatten voor de ontharding van leidingwater onder andere zeolieten. Deze vaste, slecht oplosbare stoffen zijn natriumaluminumsilicaten. In een publicatie over zeolieten wordt het volgende model van een fragment van het kristalrooster van een zeoliet afgebeeld. Uit dit fragment zijn de Na⁺-ionen weggelaten. De zigzag geeft aan dat het een fragment betreft.

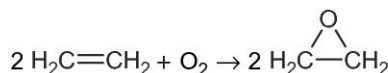


In dit model zijn de bindingen voorgesteld als covalente bindingen (atoombindingen). De consequentie van de aanname dat de bindingen tussen Al en O covalent zijn, is dat in dit model een negatieve lading op Al moet worden geplaatst.

- a** Leid uitgaande van de bovenstaande lewisstructuur af hoe groot de negatieve lading is die op elk aluminium-atoom moet worden geplaatst.
- b** Leg met behulp van het omringingsgetal van Al en O in dit model uit of een zeoliet een vlakke structuur heeft zoals hier is getekend.

C 23

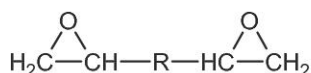
Het weefsel carbon is uiterst geschikt voor het maken van lichte, maar stevige constructies. Carbon wordt gemaakt uit koolstofvezels, versterkt door een epoxyhars. Een epoxyhars wordt gevormd uit onder andere di-epoxiden. De grondstof voor de di-epoxiden is epoxyethaan dat wordt gemaakt door etheen te laten reageren met zuurstof.



Als nevenreactie wordt etheen met zuurstof omgezet in koolstofdioxide en water. Het mengsel dat uit de reactor komt wordt in de scheidingsruimte in contact gebracht met water. Het epoxyethaan lost hier in op; het koolstofdioxide en het niet-omgezette etheen lossen vrijwel niet op in het water.

- a** Leg uitgaande van de molecuulbouw van epoxyethaan en koolstofdioxide uit waarom je mag verwachten dat epoxyethaan beter oplosbaar is in water dan koolstofdioxide.

Van epoxyethaan wordt een di-epoxide gemaakt, waarvan je de structuur als volgt kunt weergeven:



Een epoxidegroep is op te vatten als een cyclische ether. Van alle ethers blijken de stoffen met een epoxidegroep veel reactiever te zijn dan lineaire ethers. De reden hiervoor is dat de bindingshoeken in de ring van een epoxidegroep afwijken van wat de VSEPR-theorie voorspelt. Hierdoor is de activeringsenergie voor het verbreken van de C-O-binding in een epoxidegroep veel lager dan bij een lineaire ether.

- b** Leg uit dat de bindingshoeken in de ring van een epoxidegroep afwijken van wat de VSEPR-theorie voorspelt.

Na het vormen van de epoxyhars uit de di-epoxide ontstaat er op de plek van de epoxidegroep een OH-groep.

Om een voorwerp van carbon te produceren worden de bestanddelen van de epoxyhars, samen met een koolstofvezel in een mal geperst. Voor de sterkte van het carbon is het van belang dat de koolstofvezels goed hechten aan de epoxyhars. Op microniveau bestaan de vezels uit meerdere koolstoflaagjes van elk één atoom dik, vergelijkbaar met grafiet (Binas tabel 67E). Dankzij de platte vorm liggen de lagen dicht op elkaar.

- c** Leg uit welk omringingsgetal en ruimtelijke bouw de koolstofatomen moeten hebben om de laagjes een dikte van één atoom aan te laten nemen.

Naar: CE vwo 2016-II

Je kunt nu

- uitleggen welke bindingen er voorkomen bij moleculaire stoffen;
- de ruimtelijke bouw van een molecuul voorspellen aan de hand van de lewisstructuur;
- voorspellen of een molecuul een dipool is.

Polycarbonaat

Bisfenol A (BPA) is een grondstof voor polycarbonaat, een hard plastic dat bijvoorbeeld veel wordt toegepast in de politieschilden hiernaast en in verpakkingen van voedingsmiddelen. Niet-gereageerde restanten van BPA komen via voeding in het lichaam terecht. Vandaar dat vrijwel iedereen in West-Europa sporen van BPA in zijn lichaam heeft.

**Je leert**

- wat mesomerie is;
- hoe je met lewisstructuren de stabiliteit van een molecuul of ion kunt voorspellen.

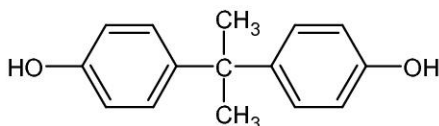
12.3 Mesomerie



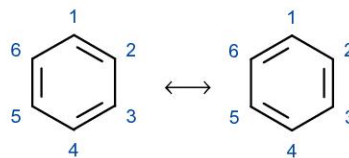
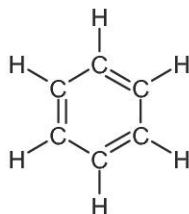
12.30 Bisfenol is in te grote hoeveelheid schadelijk voor de gezondheid. Drinkflesjes voor baby's moeten vrij zijn van BPA.

Benzeen en fenol

Benzeenringen en verbindingen met benzeenringen komen veel voor in de natuur en zijn vaak erg stabiel. Bisfenol A is een verbinding waarin twee benzeenringen voorkomen. Door deze stabiliteit wordt bisfenol A maar moeilijk afgebroken en blijven de resten lang in iemands lichaam achter (figuur 12.30).



Om de stabiliteit van een benzeenring te verklaren moet je op microniveau naar een benzeenmolecuul kijken. Je ziet dan zes koolstofatomen met aan elk koolstofatoom een waterstofatoom, zie de structuur hieronder. De drie dubbele bindingen in de ring zitten niet op vaste plaatsen. De zes elektronen die de drie dubbele bindingen vormen verplaatsen zich in de ring. Hierdoor zijn er voor benzeen twee lewisstructuren mogelijk:



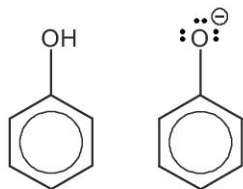
Dit verschijnsel, waarbij je voor een molecuul of ion meerdere lewisstructuren kunt noteren, heet **mesomerie** of resonantie. De twee structuren worden **grensstructuren** genoemd.



12.31

De pijl tussen grensstructuren ($\longleftrightarrow$) wijst beide kanten op. Dat geeft aan dat deze structuren niet op zichzelf bestaan, maar dat de stof het midden houdt tussen alle grensstructuren. In werkelijkheid is er dus sprake van maar één structuur. Bij benzeen wordt dat dikwijls aangegeven met een ring in de structuurformule (figuur 12.31). Je gebruikt dus bij grensstructuren een ander soort pijl dan bij een chemisch evenwicht, waarbij alle structuren echt aanwezig zijn.

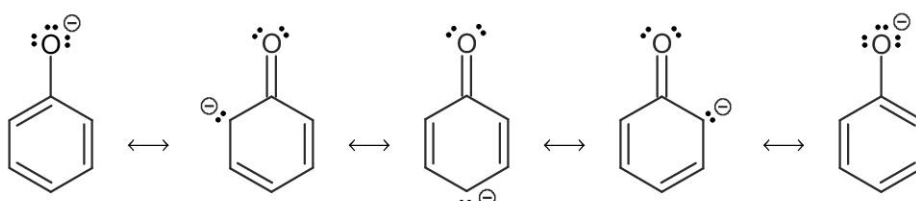
Hoe meer grensstructuren er van een molecuul of ion zijn, hoe stabiel dat deeltje en de bijbehorende stof is. Daardoor zijn benzeenmoleculen en moleculen met benzeenringen vaak heel stabiel.



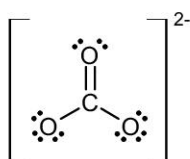
a
12.32 Fenol (a) en fenolaat (b)

Het in de opening genoemde bisfenol A wordt geproduceerd uit fenol (systematische naam benzenol), een benzeenring met een OH-groep (figuur 12.32a). De stof is een zuur. Als fenol een H^+ -ion afgeeft, dan ontstaat het fenolaat (figuur 12.32b).

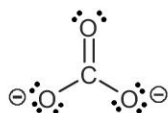
In tegenstelling tot de negatieve ionen die andere alcoholen vormen als ze een H^+ afgeven, blijkt dit ion stabiel te zijn. Deze stabiliteit heeft te maken met mesomerie. Er zijn namelijk vijf grensstructuren te tekenen van het fenolaat, zoals je kunt zien in figuur 12.33. Door de stabiliteit van het fenolaat is fenol in tegenstelling tot ethanol een zuur.



12.33 Grensstructuren van het fenolaat



12.34a

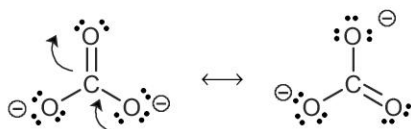


12.34b

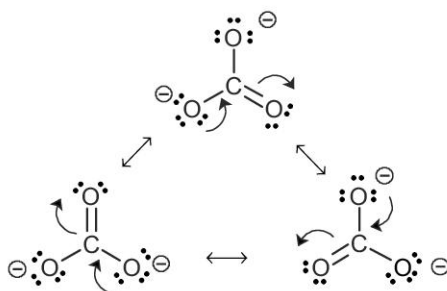
Het opstellen van grensstructuren

Hoe je zelf grensstructuren opstelt, wordt hieronder uitgelegd aan de hand van het carbonaat. Om alle grensstructuren van het carbonaat te vinden teken je eerst de lewisstructuur, zie figuur 12.34a. Daarna geef je in de lewisstructuur bij elk atoom de formele lading aan, zie figuur 12.34b.

Door elektronenparen te verplaatsen naar naastgelegen atomen krijg je een grensstructuur. Daarbij kan een bindend elektronenpaar een vrij elektronenpaar worden en andersom:



Vanuit de tweede grensstructuur kun je weer een nieuwe grensstructuur vinden door het opnieuw verplaatsen van elektronenparen.





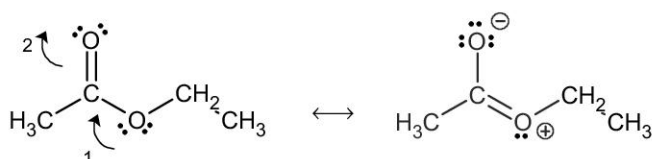
12.35 Theebladeren worden verzameld en gewogen in de hooglanden van Sri Lanka. Ethylethanoaat wordt gebruikt om cafeïne uit theebladeren te extraheren.

Van het carbonaation kun je drie grensstructuren tekenen. De echte lewisstructuur van het carbonaation is een combinatie van de verschillende grensstructuren. Er is dus maar één structuur waarbij de negatieve lading is verdeeld over alle drie de O-atomen. Je ziet dat met het verspringen van de elektronenparen ook de formele lading van het ene atoom naar een ander atoom wordt verplaatst. Dit gebeurt ook in figuur 12.33 bij het fenolaation.

Let er bij het opstellen van grensstructuren op dat de lewisstructuren die je maakt, blijven kloppen. Dat wil zeggen dat elk atoom de juiste formele lading heeft en dat elk atoom aan de octetregel blijft voldoen. Een ander voorbeeld van grensstructuren staat uitgewerkt in het voorbeeld hieronder.

Voorbeeld

Teken de grensstructuren van een molecuul ethylethanoaat, $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ (figuur 12.35 en 12.36).



Eén van de vrije elektronenparen op het rechter O-atoom wordt een bindend elektronenpaar (pijl 1). Daardoor ontstaat een dubbele binding. Bij pijl 2 wordt een bindend elektronenpaar een vrij elektronenpaar, er ontstaat een enkele binding. De som van de formele ladingen is nul, dus de grensstructuur is nog steeds een neutraal molecuul.



12.36 Ethylethanoaat heeft net als veel andere esters een fruitachtige geur en komt daarom vaak voor in snoep.

Samenvatting

- Als je van een verbinding meerdere lewisstructuren kunt tekenen, noem je dit mesomerie. De verschillende structuren zijn grensstructuren. In werkelijkheid is er maar één structuur die het midden houdt tussen alle grensstructuren.
- Hoe meer grensstructuren een molecuul of ion heeft, hoe stabiel het is.
- Mesomerie treedt op door verplaatsing van elektronenparen. De grensstructuren vind je door in de lewisstructuur de formele lading aan te geven en van daaruit elektronenparen te verplaatsen.

Opdrachten

A 24

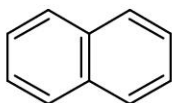
- a Wanneer treedt er mesomerie op?
b Leg uit wat grensstructuren zijn.

A 25

- a Teken de grensstructuren van benzeen.
b Teken de grensstructuren van het carbonaation.

A 26

Hieronder zie je de structuurformule van naftaleen.



- a Geef de molecuulformule van naftaleen.
b Teken twee grensstructuren van naftaleen.

B 27

Neem figuur 12.33 in zijn geheel over en geef met pijltjes aan hoe de elektronenparen zich verplaatsten om van de ene grensstructuur naar die direct rechts ervan te gaan. Doe dat bij alle formules.

B 28

Naast aromaten zoals benzeen zijn er meer cyclische moleculen die grensstructuren hebben.

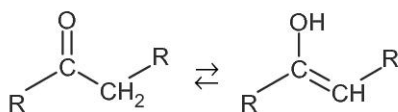
- a Leg uit of cyclohexaan grensstructuren heeft.
b Leg uit waardoor cyclohexanol niet zuur is.

B 29

Als azijnzuur (ethaanzuur) een H^+ -ion afgeeft, dan ontstaat het acetaation. Het acetaation wordt gestabiliseerd door mesomerie. Teken de twee grensstructuren van het acetaation. Geef met pijltjes aan hoe de elektronenparen zich verplaatsen.

B 30

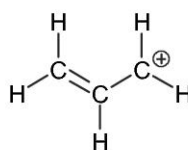
Het is mogelijk dat een molecuul met een keton of aldehydegroep ($C=O$) overgaat in een 'enol'. Dat is een molecuul met een dubbele binding en een aangrenzende alcoholgroep (OH). Dit wordt het keto-enolevenwicht genoemd. Hieronder zie je deze reactie in structuurformules.



- a Geef de vergelijking in structuurformules van het keto-enolevenwicht van butanon.
b Leg uit of in een keto-enolevenwicht de structuurformule voor de pijl een grensstructuur is van de structuurformule na de pijl.

B 31

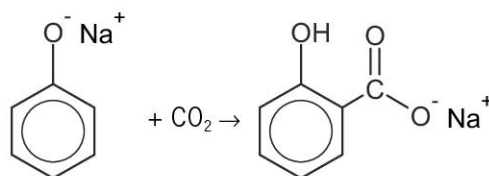
In de organische chemie komt het allylion voor: $C_3H_5^+$, zie hieronder.



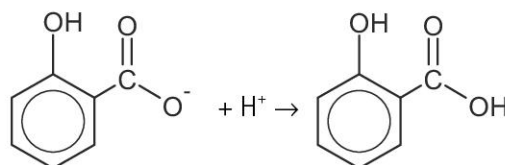
- a Teken een grensstructuur van het allylion.
b Leg uit waardoor dit ion stabiel is dan het propylion ($C_3H_7^+$).

B 32

Voordat men acetylsalicylzuur (aspirine) ging gebruiken werd salicylzuur als pijnstiller gebruikt. Salicylzuur kun je als volgt bereiden. Eerst laat je het zout natriumfenolaat reageren met koolstofdioxide, hierbij wordt natriumsalicylaat gevormd.



Door vervolgens het natriumsalicylaat in oplossing met een sterk zuur te laten reageren wordt salicylzuur verkregen.



Bij deze bereiding wordt, naast salicylzuur, ook 4-hydroxybenzeencarbonzuur gevormd. Er ontstaat geen 3-hydroxybenzeencarbonzuur. Dit kun je verklaren door aan te nemen dat sommige C-atomen in het fenolaation enigszins negatief zijn geladen. Het enigszins positief geladen C-atoom van het CO_2 -molecuul hecht zich aan een van die negatief geladen C-atomen.

- a** Leg uit dat, hoewel het CO_2 -molecuul elektrisch neutraal is, het C-atoom in het CO_2 -molecuul toch een beetje positief is geladen.

Dat sommige C-atomen van het fenolaation enigszins negatief zijn geladen, is gebaseerd op mesomerie. Uit het feit dat ook 4-hydroxybenzeencarbonzuur wordt gevormd kun je afleiden dat ook C-atoom 4 enigszins negatief is geladen.

- b** Geef de twee grensstructuren van het fenolaation waarmee je het ontstaan van salicylzuur en 4-hydroxybenzeencarbonzuur kunt verklaren.

Als je aanneemt dat de ladingen van alle negatief geladen C-atomen in een fenolaation even groot zijn en dat geen andere factoren dan deze ladingen een rol spelen, kun je een uitspraak doen over de hoeveelheid gevormd salicylzuur ten opzichte van de hoeveelheid gevormd 4-hydroxybenzeencarbonzuur bij deze bereidingswijze.

- c** Leg uit of de hoeveelheid gevormd salicylzuur groter of kleiner zal zijn dan de hoeveelheid gevormd 4-hydroxybenzeencarbonzuur.

C 33

Perchloorzuur (HClO_4) is een krachtige oxidator die vaak in combinatie met salpeterzuur wordt gebruikt om organische stoffen te ontleden. Het is ook een sterk zuur en wordt daarom ook toegepast bij titraties. Perchloorzuur ioniseert in water waarbij het perchloraat-ion ontstaat.

- a** Geef de vergelijking van de reactie die verloopt als perchloorzuur met water reageert.
- b** Teken de lewisstructuur van het perchloraat-ion. De covalentie van het chlooratoom is 7.
- c** Leg uit hoeveel mogelijke grensstructuren het perchloraat-ion heeft.

Perchloraten zijn sterke oxidatoren en worden daarom, gemengd met zwavel, gebruikt in vuurwerk. In het verleden gebruikte men daar chloraten voor (ClO_3^-). Deze bleken echter te instabiel te zijn, waardoor de kans op vroegtijdige ontbranding te groot was.

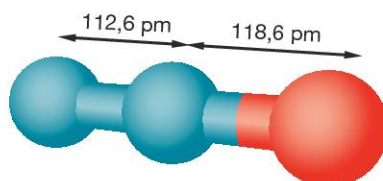
- d** Teken de lewisstructuur van het chloraation. De covalentie van het chlooratoom is 5.
- e** Verklaar met mesomerie waarom het perchloraat-ion stabiel is dan het chloraation.

C 34 Lachgas ★

Lachgas kent veel toepassingen, zie figuur 12.38. In een molecuul van lachgas, N_2O , heeft het middelste N-atoom een covalentie van 4.

- a** Teken een lewisstructuur van N_2O . Geef ook eventuele formele ladingen aan.
- b** Teken naast de lewisstructuur een mogelijke grensstructuur van een molecuul N_2O . Houd hierbij rekening met het feit dat hoe lager de formele ladingen zijn, hoe stabiel het molecuul is.

De bindingslengte is de gemiddelde afstand tussen de kernen van twee atomen in een verbinding. Met behulp van een techniek genaamd röntgendiffractie zijn de bindingslengten in een N_2O -molecuul bepaald (figuur 12.37).



12.37

In Binas tabel 53A vind je een aantal bindingslengten van veelvoorkomende atoombindingen.

- c** Beredeneer aan de hand van gegevens uit deze tabel welke van de twee grensstructuren in N_2O het dichtst de werkelijke structuur benadert.



12.38 Lachgas wordt bijvoorbeeld gebruikt als drijfgas in bussen spuitslagroom.

Je kunt nu

- de grensstructuren van een molecuul of ion geven;
- de stabiliteit van een verbinding met behulp van mesomerie verklaren.

Blessures

Sporters met een kleine blessure worden vaak tijdens de wedstrijd met een koudespray behandeld. Met een spuitbus brengt een verzorger chloorethaan op het gekneusde lichaamsdeel aan. Deze stof verdampt snel, waardoor de huid afkoelt en de sporter minder pijn ervaart.



Je leert

- wat een reactiemechanisme is;
- volgens welke reactiemechanismen substitutie- en additiereacties verlopen.

12.4 Reactiemechanismen

Substitutioreacties

Het chloorethaan uit de opening kan worden gemaakt door middel van een substitutie- of een additiereactie. Bij een **substitutioreactie** wordt een atoom of atoomgroep in een koolstofverbinding vervangen door een ander atoom of atoomgroep. Substitutie betekent letterlijk 'vervangen'.



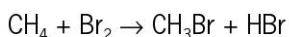
12.39 Voor het bestrijden van ongedierte in hout wordt broommethaan gebruikt.

Substitutioreacties verlopen net als veel andere reacties meestal niet in één stap, maar via een aantal snelle deelstappen. Een beschrijving van het verloop van een reactie in meerdere stappen noem je een **reactiemechanisme**. Met de kennis uit de voorgaande paragrafen kun je de reactiemechanismen van substitutioreacties in kaart brengen.

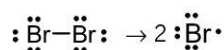
Wanneer je het reactiemechanisme kent, kun je bijvoorbeeld in een fabriek voorkomen dat er ongewenste substitutioreacties verlopen. Het productieproces wordt daardoor efficiënter. Sommige substitutioreacties verlopen volgens een **radicaalmechanisme**, andere via een **ionair mechanisme**.

Radicaalmechanisme

Broommethaan wordt gebruikt als pesticide bij geïmporteerd hout, zie figuur 12.39. Broommethaan wordt gemaakt door de stof broom te laten reageren met methaan. Als je op microniveau naar deze reactie kijkt, blijkt dit een substitutioreactie te zijn, waarbij een waterstofatoom van methaan wordt vervangen door een broomatoom. Deze reactie verloopt in drie stappen volgens een radicaalmechanisme. De netto reactievergelijking is:



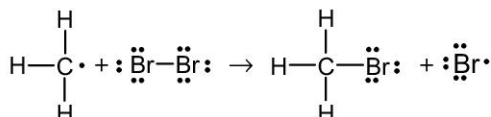
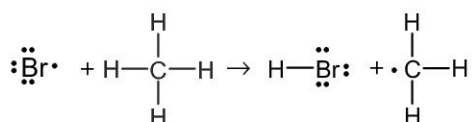
Stap 1: Door absorptie van uv-straling worden de broommoleculen (figuur 12.40a) van de stof broom gesplitst in broomradicalen, zie hieronder. Deze stap is de **initiatie**.



Stap 2: Aangezien radicalen zeer reactief zijn, kan een radicaal met een H-atoom van methaan reageren. Zo ontstaan waterstofbromide en een methylradicaal ($\text{CH}_3\cdot$). Het methylradicaal kan daarna met broom reageren tot broommethaan en weer een broomradicaal. Deze twee reacties kunnen doorgaan tot een van de beginstoffen is verbruikt. Deze stap is de **propagatie**.



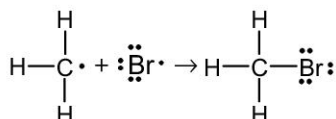
a



b

12.40 Naast broom (a) is het radicaalmechanisme ook van toepassing op chloor (b).

Stap 3: Als het methylradicaal reageert met een broomradicaal tot broommethaan kunnen deze deeltjes niet verder reageren. Deze stap is de **terminatie**.

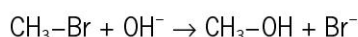


Door een overmaat broom toe te voegen kunnen uiteindelijk alle waterstofatomen van methaan worden vervangen door broomatomen. Er zullen onder andere ook moleculen ontstaan met twee of meer broomatomen.

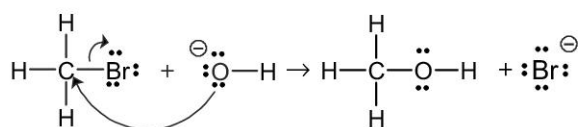
Ionair mechanisme

Het ontstane broommethaan kan via een ionair mechanisme weer andere substitutiereacties aangaan. Een negatief ion met een vrij elektronenpaar kan een binding met een positief ion aangaan. Het negatieve ion met het vrije elektronenpaar noem je **nucleofiel** ('houdt van kernen') en het positieve ion noem je **elektrofiel** ('houdt van elektronen').

Bij het ionair mechanisme van een substitutiereactie wordt een nucleofiel deeltje gebruikt, bij de reactie van broommethaan hieronder is dat het hydroxide-ion.



Bij deze reactie geeft broommethaan een Br^- af en verliest daarmee een elektronenpaar. Er blijft een elektrofiel deeltje over. OH^- is nucleofiel en heeft dus een elektronenpaar om te delen. Zo krijgt koolstof weer vier elektronenparen om zich heen en is er methanol ontstaan. Met lewisstructuren is het verschuiven van de elektronenparen zichtbaar:

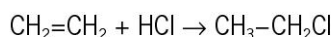


Additiereacties

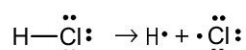
Bij een **additiereactie** ontstaat uit twee of meer moleculen één nieuw molecuul. Additie betekent letterlijk 'toevoegen'. Additiereacties verlopen vaak aan dubbele bindingen, waarbij een enkele binding ontstaat. Net als bij de substitutiereacties verlopen sommige additiereacties volgens een radicaalmechanisme en andere via een ionair mechanisme.

Radicaalmechanisme

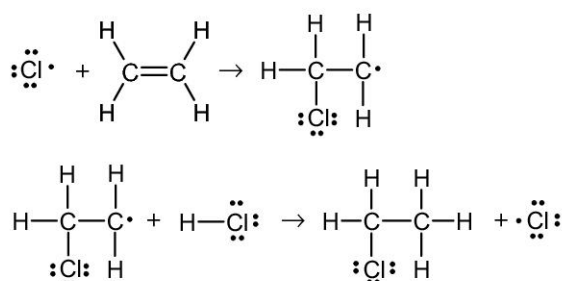
Chloorethaan (figuur 12.41) wordt gemaakt door de stof waterstofchloride te laten reageren met de stof etheen. Op microniveau blijkt de additiereactie in drie stappen te verlopen. De netto reactievergelijking is:



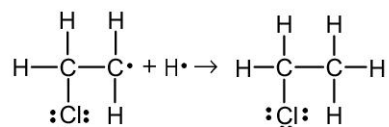
Stap 1 **initiatie**: Uit waterstofchloride worden onder invloed van peroxides (verbindingen met een -O-O-binding) radicalen gevormd.



Stap 2 **propagatie**: Etheen reageert met het chloorradicaal. Daarbij ontstaat een chloorethaanradicaal. Dit reageert met waterstofchloride tot chloorethaan en een chloorradicaal. Deze twee reacties kunnen doorgaan tot een van de beginstoffen is verbruikt.

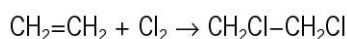


Stap 3 **terminatie**: Als een chloorethaanradicaal uit stap 2 reageert met een waterstofradicaal uit stap 1, dan is de reactie afgelopen.



Ionair mechanisme

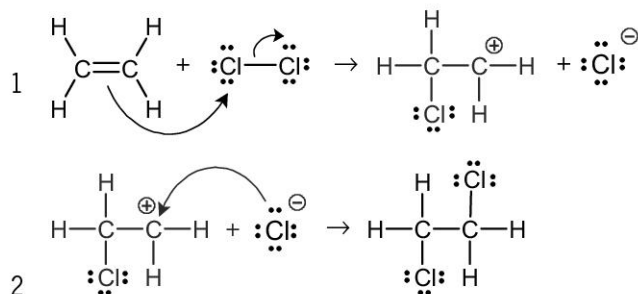
1,2-dichloorethaan wordt ook gemaakt via een additiereactie. De additie van chloor aan etheen verloopt echter via een ionair mechanisme. De netto reactievergelijking is:



In de figuur op de volgende pagina zie je dat deze reactie in twee stappen verloopt. Bij de eerste stap bindt etheen aan een van de twee chlooratomen. Zo ontstaat een positief geladen ion. Het elektronenpaar tussen de chlooratomen gaat naar het andere chlooratoom. Dit wordt dan een chloride-ion (lading 1-). Het positief geladen ion is elektrofiel en het reageert daardoor in een tweede snelle stap met het negatieve, nucleofiele chloride-ion dat in de eerste stap is ontstaan.



12.41 Chloorethaan wordt in de industrie nog gebruikt om uit cellulose ethylcellulose te maken, een bindmiddel in verf en cosmetica.

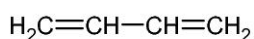


12.42 Er bestaat ook natuurlijk rubber, dat gewonnen wordt uit de rubberboom.

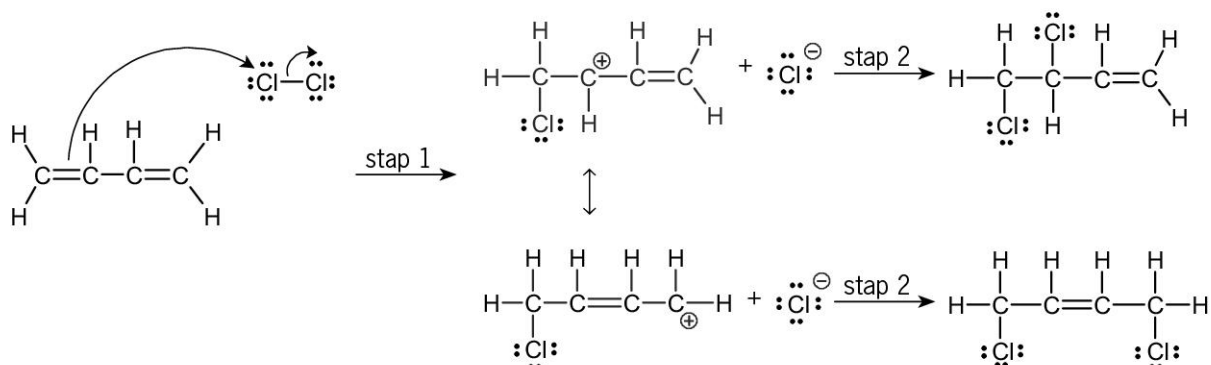
Additiereacties kunnen verlopen met onder andere halogenen (F_2 , Cl_2 , Br_2 , I_2), waterstofhalogeniden (HF , HCl , HBr , HI), waterstof en water (H--OH). Er is, in tegenstelling tot sommige substitutiereacties, geen uv-straling voor nodig.

1,2- en 1,4-additie

De grondstof voor synthetisch rubber is buta-1,3-dieen (figuur 12.42). De moleculen van de stof buta-1,3-dieen hebben twee dubbele bindingen, waartussen een enkele binding zit:



Vanwege de dubbele bindingen is een additiereactie mogelijk, die verloopt volgens een ionair mechanisme, zie hieronder. Als een molecuul buta-1,3-dieen reageert met een molecuul chloor ontstaan er echter twee additieproducten. Bij stap 1 van het mechanisme ontstaat net als bij het voorbeeld hierboven een positief ion, maar dit ion heeft grensstructuren. Het chloride-ion kan bij stap 2 een binding vormen met een van beide positief geladen C-atomen. De chlooratomen zitten bij één product aan de C-atomen waartussen de dubbele binding zich bevond. Dit is een **1,2-additie**. Bij het andere product zitten de chlooratomen op het eerste en vierde koolstofatoom, dit is een **1,4-additie**.



Samenvatting

- Een reactiemechanisme is het weergeven van een reactie in meerdere deelstappen.
- Bij een substitutiereactie wordt een atoom of atoomgroep in een koolstofverbinding vervangen door een ander atoom of atoomgroep. Deze reactie kan verlopen via een radicaalmechanisme of een ionair mechanisme.
- Bij een additiereactie ontstaat uit twee of meer moleculen één nieuw molecuul. Hierbij verandert een dubbele binding in een enkele binding. Deze reactie kan via een radicaalmechanisme of een ionair mechanisme verlopen.
- Door mesomerie kan er bij alkadiënen waarbij tussen de dubbele binding maar één enkele binding zit zowel 1,2- als 1,4-additie optreden.

Krachtige antioxidant

Voor veel organismen, zoals wij mensen, is zuurstof één van de voorwaarden voor leven. Tegelijkertijd is zuurstof een sterke oxidator, waardoor oxidatiereacties op kunnen treden waaruit vrije radicalen ontstaan. Deze radicalen brengen kettingreacties teweeg die cellen beschadigen.

Antioxidanten zijn stoffen die de schadelijke effecten van zuurstof tegengaan. Ze doen dit door een binding met de vrije radicalen aan te gaan. Je kunt naast je voeding synthetische antioxidant innemen, maar ze komen ook natuurlijk voor in bijvoorbeeld noten en fruit (figuur 12.43). Vitamine E is een voorbeeld van een antioxidant die zowel natuurlijk voorkomt, als in een laboratorium wordt gesynthetiseerd.

In een onderzoek aan de Vanderbilt Universiteit in Nashville hielden onderzoekers zich bezig met het versterken van de eigenschappen van vitamine E-achtige antioxidant. De sleutel tot het versterken van antioxidant eigenschappen is stikstof. Het was al langer bekend dat de aanwezigheid van stikstofatomen antioxidant eigenschappen kan verbeteren, maar het toevoegen van stikstofatomen leidde altijd tot een instabiel molecuul.

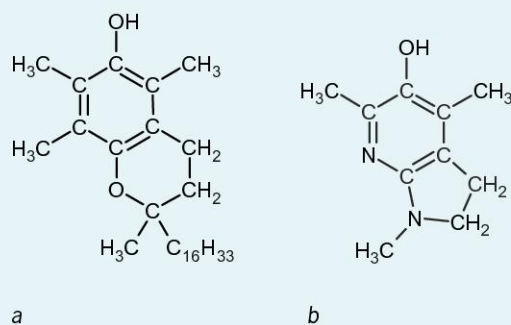
De onderzoekers zijn uiteindelijk in hun opzet geslaagd door geen stikstofatomen toe te voegen, maar door koolstof- en zuurstofatomen in vitamine E te vervangen door stikstofatomen (figuur 12.44).

Hoewel dit misschien klinkt als een simpele substitutiereactie, kostte het meer dan een jaar onderzoek om een geschikte syntheseroute te ontwikkelen. De uiteindelijke synthese verloopt in twaalf aparte reacties.

Een tweede onderzoeksgroep in Italië heeft de nieuwe vorm van vitamine E getest op antioxidant werking. Hieruit bleek dat de nieuwe vorm 5 tot 88 keer sneller vrije radicalen kan binden dan natuurlijk vitamine E.

Ondanks de zeer positieve resultaten in de verbetering van vitamine E, is het nog nooit klinisch aangetoond dat antioxidant als voedingssupplement daadwerkelijk leiden tot een afname in gezondheidsrisico's. Maar onderzoek gaat altijd door, misschien leveren sterkere vitamine E soorten wel positieve effecten op.

Bron: NEMO Kennislink



12.44 Natuurlijk vitamine E (a) en de verbeterde vorm (b)



12.43 Van alle vruchten bevatten kiwi's de meeste vitamine E.

● Opdracht C45

Opdrachten

A 35 

Hoe heten de stappen van het radicaalmechanisme?

A 36

Leg uit waardoor H_3O^+ en OH^- met elkaar reageren. Gebruik in je antwoord de termen nucleofiel en elektrofiel.

A 37 

- Geef de vergelijking van de reactie waarbij broommethaan dibroommethaan wordt.
- Leg uit of dit een additie- of een substitutiereactie is.
- Leg uit hoeveel broommoleculen je nodig hebt om van een methaanmolecuul een tetrabroommethaanmolecuul te maken.

B 38

Bij de radicaalreactie van broom met methaan onder invloed van uv-straling kan er in de terminatiefase ook een alkaan ontstaan.

- Verklaar dit aan de hand van het reactiemechanisme.
- Wat is de naam van het alkaan?
- Welke andere stof, naast broommethaan en die van opgave b, kan ook ontstaan als reactieproduct van stap 3?

B 39

Geef de vergelijking in lewisstructuren van de substitutiereactie van jodethaan en hydroxide-ionen. Gebruik het ionair mechanisme. Geef duidelijk de verplaatsing van de elektronenparen aan.

B 40

Guido voert in het donker een reactie uit tussen but-2-een en fluor. Er ontstaat een difluorbutaan.

- Leg uit welke type reactie is opgetreden.
- Geef het ionair mechanisme van deze reactie in lewisstructuren. Geef met pijltjes aan hoe de elektronenparen zich verplaatsen.
- Geef het radicaalmechanisme van deze reactie in structuurformules. Geef alle drie de stappen van het mechanisme apart.

B 41

- Geef de structuurformule van alle reactieproducten van buta-1,3-dien en waterstofbromide. Ga ervan uit dat er zowel 1,2-additie als 1,4-additie zal optreden.
- Geef de naam van alle reactieproducten.

B 42

- Leg uit waardoor er wel 1,2-additie, maar geen 1,4-additie mogelijk is bij penta-1,4-dien.
- Geef de naam van het reactieproduct van de additie van penta-1,4-dien met een overmaat jood.

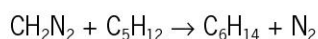
B 43

In de introtekst gaat het over chloorethaan. Deze stof kun je maken via een substitutiereactie, maar ook via een additiereactie.

- Geef van beide reacties de vergelijking in structuurformules.
- Leg uit waarom de additiereactie beter is voor het milieu.

C 44 **Insertiereactie** ★

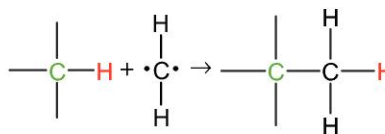
Diazomethaan, CH_2N_2 , reageert gemakkelijk met alkanen (figuur 12.45). Meng je diazomethaan met een grote overmaat pentaan, dan worden stikstof en alkanen met de formule C_6H_{14} gevormd:



De gevormde alkanen zijn hexaan, 2-methylpentaan en 3-methylpentaan. Men neemt aan dat bij dit soort reacties het diazomethaan ontleedt onder vorming van stikstof en het zeer reactieve methyleen, CH_2 . Een methyleendeeltje kan worden opgevat als een dubbelradicaal.

- Geef de vergelijking van deze reactie in structuurformules.

De reactieproducten die ontstaan als je diazomethaan met een alkaan laat reageren wijzen erop dat de gevormde methyleendeeltjes zich voegen tussen het C-atoom en het H-atoom van een C-H-binding van een alkaanmolecuul:



Zo'n reactie wordt een insertiereactie genoemd.

Men veronderstelt dat deze reactie in één stap verloopt: gelijktijdig wordt een C-H-binding verbroken en worden een C-C-binding en een C-H-binding gevormd (mechanisme I). Laat je diazomethaan met een overmaat pentaan reageren, dan blijken de molverhouding waarin hexaan, 2-methylpentaan en 3-methylpentaan ontstaan, zo te zijn dat je moet

aannemen dat reacties volgens mechanisme I bij alle C–H-bindingen even gemakkelijk plaatsvinden.

- b** Leg uit in welke molverhouding de genoemde alkanen ontstaan als je diazomethaan met een overmaat pentaan laat reageren.

Door in de bovenbeschreven proef pentaan in een grote overmaat te gebruiken, wordt tegengegaan dat behalve de drie genoemde alkanen nog andere alkanen ontstaan.

- c** Leg uit waarom er ook andere alkanen ontstaan, wanneer pentaan niet in grote overmaat wordt gebruikt.

Bij een proef waarin men diazomethaan in een grote overmaat propaan laat reageren, worden de de reactieproducten butaan en 2-methylpropaan in een verhouding gevonden die erop wijst dat ook in dat geval reacties volgens mechanisme I reageren.

Men vindt echter in het reactiemengsel ook zeer kleine hoeveelheden van vier andere alkanen, waaronder ethaan en hexaan. Men veronderstelt daarom dat in dit geval behalve mechanisme I nog een mechanisme een rol speelt. In de eerste stap van dit mechanisme (mechanisme II) onttrekt een methyleendeeltje een H-atoom aan een propaanmolecuul, waardoor twee radicalen ontstaan. In de tweede stap van dit mechanisme hechten gevormde radicalen zich aaneen.

- d** Geef de reactievergelijkingen van de vorming van butaan volgens mechanisme II.
- e** Leg uit hoe je met mechanisme II het ontstaan van ethaan en hexaan kunt verklaren.
- f** Geef de structuurformules van de twee andere alkanen die op grond van mechanisme I *niet* en op grond van mechanisme II *wel* in het reactiemengsel voorkomen. Geef een verklaring voor je antwoord.

Bron: Nationale Scheikundeolympiade 2017

C 45

Lees de tekst in het kader 'Krachtige antioxidant' en beantwoord de volgende vragen.

De synthese van de verbeterde versie van vitamine E wordt, hoewel er koolstofatomen worden vervangen door stikstofatomen, niet beschouwd als alleen een substitutiereactie.

Er vinden namelijk ook andere wijzigingen plaats aan de structuur, zie figuur 12.44.

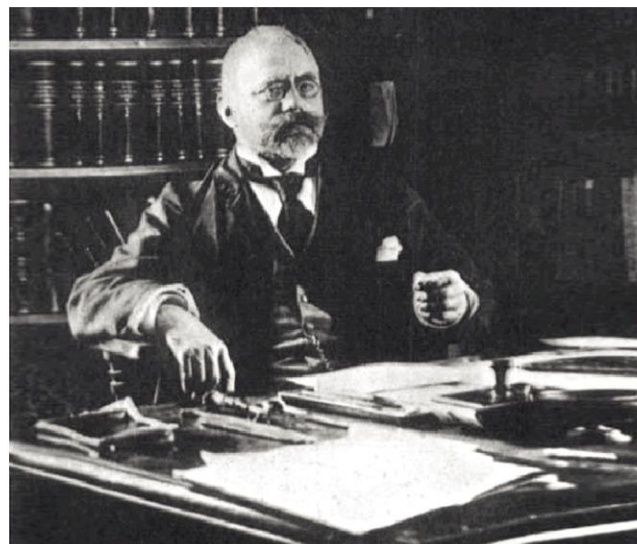
- a** Benoem twee andere wijzigingen die worden aangebracht aan een molecuul vitamine E.

De meest voorkomende radicalen die ontstaan als gevolg van oxidatiereacties in je lichaam zijn het hydroxylradicaal ($\bullet\text{OH}$), het superoxide-anionradicaal ($\bullet\text{O}_2^-$) en het stikstofmonoxideradicaal ($\bullet\text{NO}$).

- b** Geef de lewisstructuur van deze drie radicalen.

Het superoxide-anionradicaal en het stikstofmonoxideradicaal reageren samen tot peroxylnitriet (ONOO^-). Deze stof heeft allerlei schadelijk gevolgen. Zo reageert hij snel met eiwitten, die daardoor inactief worden, en beschadigt hij de mitochondriën.

- c** Geef de reactievergelijking in lewisstructuren tussen het superoxide-anionradicaal en het stikstofmonoxideradicaal, waaruit peroxylnitriet ontstaat.



12.45 Hans von Pechmann (1850-1902) was een Duits scheikundige en de ontdekker van diazomethaan.

Je kunt nu

- het reactiemechanisme van substitutie- en additiereacties uitleggen met behulp van verplaatsing van elektronenparen, radicalen en de begrippen nucleofiel en elektrofiel;
- uitleggen hoe 1,2- en 1,4-additie verloopt met behulp van grensstructuren.

Een veilig thuis

De schelp van een slak is soms rechtsdraaiend, soms linksdraaiend: ze zijn elkaars spiegelbeeld. Een klein verschil met een bijzonder effect. Een soort slang die deze slakken eet heeft rechts meer tanden dan links en valt daardoor altijd vanaf de linkerzijde aan. De slang kan slakken met een linksdraaiend huisje bijna niet vastpakken, waardoor deze meer kans hebben op overleven.

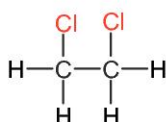
**Je leert**

- wat stereo-isomerie is;
- welke vormen van stereo-isomerie er zijn.

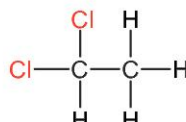
12.5 Stereo-isomerie

Vrije draaibaarheid

De ruimtelijke bouw van de verschillend gedraaide huisjes van de slak lijkt sterk op elkaar, maar is wel van invloed op de overlevingskansen van de slak. Ook moleculen die op het eerste gezicht veel op elkaar lijken, kunnen door een verschil in ruimtelijke bouw andere eigenschappen hebben. In hoofdstuk 6 heb je **isomeren** leren kennen als stoffen met dezelfde molecuulformule, maar verschillende structuurformules. In deze paragraaf leer je een nieuw soort isomerie kennen. Zoals je weet zijn er twee verschillende structuurformules te tekenen van de molecuulformule $C_2H_4Cl_2$:



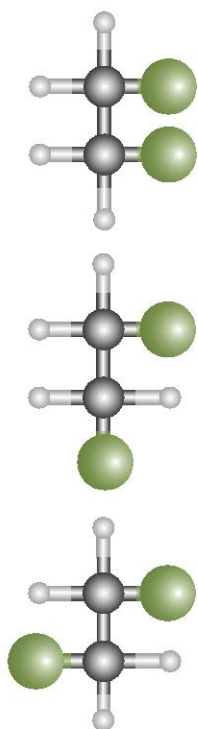
1,2-dichloorethaan



1,1-dichloorethaan

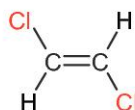
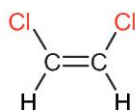
Dit zijn twee verschillende stoffen, met verschillende stoffeigenschappen. Deze isomeren zijn **structuurisomeren**, omdat de moleculen van de stoffen een verschillende structuur hebben. De volgorde waarin je de atoomsoorten tegenkomt is anders.

Je kunt de stof 1,2-dichloorethaan wel op verschillende manieren tekenen, maar door de vrije draaibaarheid rond de C–C-binding is het steeds dezelfde structuur, zie figuur 12.46. Alle drie de tekeningen zijn dus dezelfde stof: 1,2-dichloorethaan.



12.46 Drie moleculen van 1,2-dichloorethaan

Rondom een dubbele binding in een molecuul is er geen vrije draaibaarheid, de dubbele binding is een starre binding. Als je kijkt naar de volgende twee structuurformules van 1,2-dichlooretheen, dan zie je dat de volgorde van de atomen hetzelfde is.



Het zijn dus geen structuurisomeren, maar de ruimtelijke oriëntatie van de atomen is bij beide structuren wel anders.

Een van de twee bindingen van de dubbele binding zou verbroken moeten worden om te kunnen draaien. Er bestaan dan ook twee verschillende stoffen 1,2-dichlooretheen.

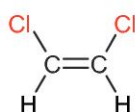
Je noemt isomeren waarbij de volgorde van de atomen hetzelfde, maar de ruimtelijke oriëntatie anders is **stereo-isomeren**.

Cis-trans-isomerie

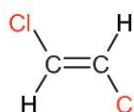
● Experiment 12.1

Om de twee verschillende vormen van 1,2-dichlooretheen te onderscheiden, moeten deze stoffen een verschillende naam krijgen. Je gebruikt hiervoor de voorvoegsels *cis* en *trans*. De aanduidingen *cis* en *trans* komen uit het Latijn. *Cis* betekent 'aan dezelfde kant van' en *trans* betekent 'aan de andere kant'.

In *cis*-1,2-dichlooretheen bevinden de Cl-atomen zich aan dezelfde kant van de dubbele binding; in *trans*-1,2-dichlooretheen bevinden ze zich aan tegenoverliggende zijden.

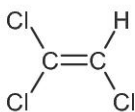


cis-1,2-dichlooretheen



trans-1,2-dichlooretheen

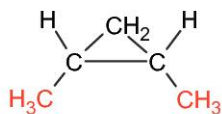
Dat *cis*-1,2-dichlooretheen een andere stof is dan *trans*-1,2-dichlooretheen blijkt uit het verschil in stoffeigenschappen. Het kook- en smeltpunt van de stoffen verschilt bijvoorbeeld, zie tabel 12.47. De stoffen lijken natuurlijk wel veel op elkaar. Daardoor hebben ze veel dezelfde stoffeigenschappen: beide zijn licht ontvlambaar, irriterend voor de luchtwegen en goede vetoplossers.



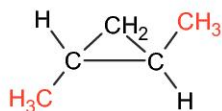
trichlooretheen (geen *cis-trans*-isomerie)

Voor *cis-trans*-isomerie moet er een starre binding aanwezig zijn. Daarnaast moeten er zowel aan de linker- als aan de rechterzijde van de starre binding twee verschillende groepen aan de koolstofatomen zijn gebonden. Er zijn van trichlooretheen hiernaast dus geen *cis-trans*-isomeren, omdat er aan het linker C-atoom twee Cl-atomen zijn gebonden.

Om snel te kunnen bepalen of er sprake is van *cis-trans*-isomerie is het handig om de structuurformule te tekenen zoals in de voorbeelden: de C-atomen van de dubbele binding horizontaal en de groepen die aan de C-atomen van de dubbele binding zijn gebonden schuin omhoog en omlaag.



cis-1,2-dimethylcyclopropan



trans-1,2-dimethylcyclopropan

In een cycloalkaan is er, net als bij een dubbele binding, geen vrije draaibaarheid in een deel van het molecuul. Dus ook bij cycloalkanen kan er sprake zijn van *cis-trans*-isomerie. Zo bestaan er van 1,2-dimethylcyclopropan *cis-trans*-isomeren die hiernaast zijn weergegeven. Bij de *cis*-vorm zitten beide methylgroepen aan een zijde van de ring, bij de *trans*-vorm zitten de methylgroepen aan weerszijden van de ring.

stof	smeltpunt (K)	kookpunt (K)
<i>cis</i> -1,2-dichlooretheen	193	333
<i>trans</i> -1,2-dichlooretheen	223	322

12.47 De stoffen *cis*- en *trans*-1,2-dichlooretheen hebben een ander smelt- en kookpunt.



12.48 Het spiegelbeeld is anders dan het oorspronkelijke beeld.

Spiegelbeeldisomerie

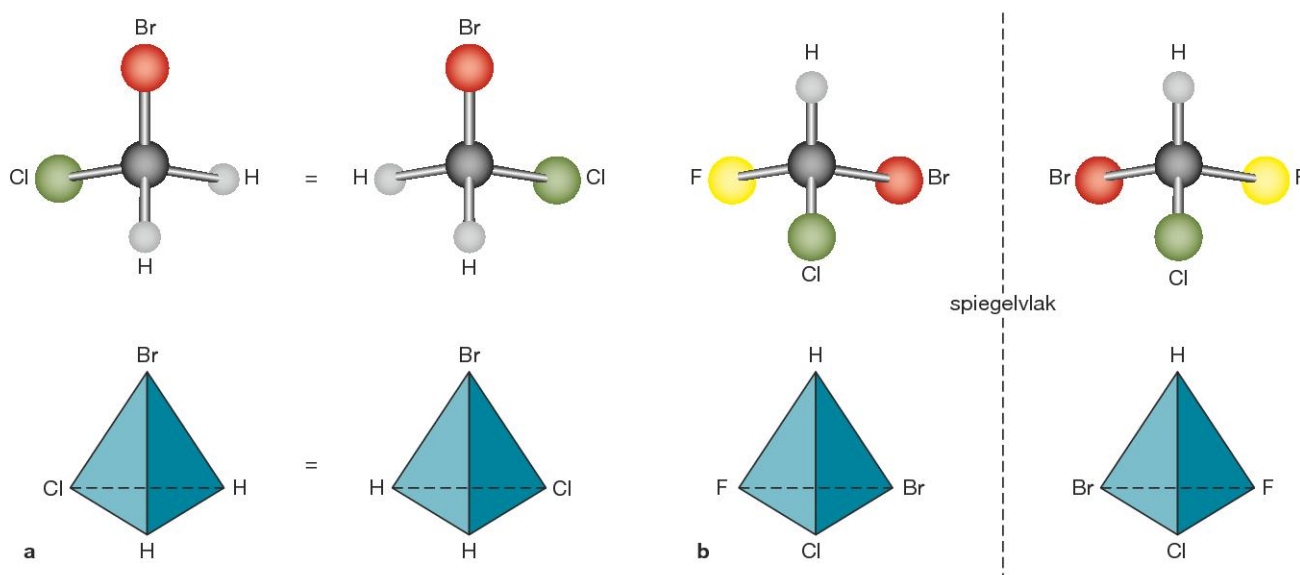
De links- en rechtsdraaiende huisjes van de slakken uit de opening van deze paragraaf zijn spiegelbeelden van elkaar (figuur 12.48). Bij veel voorwerpen is het spiegelbeeld volledig identiek aan het oorspronkelijke object, denk bijvoorbeeld aan een glas of een lepel. Maar dit geldt niet voor alles. Als je je handen voor je houdt, dan is het spiegelbeeld niet identiek aan het object. Je kunt draaien wat je wilt, maar de ene hand is niet gelijk aan de andere. Bepaalde moleculen hebben ditzelfde verschijnsel.

Door de ruimtelijke bouw kan het zo zijn dat het spiegelbeeld van een molecuul niet identiek is aan het molecuul. Je kunt dit zien als je kijkt naar de moleculen broomchloormethaan en broomchloorfluormethaan.

In figuur 12.49a is een molecuul broomchloormethaan en het spiegelbeeld van dit molecuul weergegeven. In figuur 12.49b is een molecuul broomchloorfluormethaan en het spiegelbeeld weergegeven. Als je goed kijkt naar figuur 12.49a, dan zie je dat het oorspronkelijke molecuul en het spiegelbeeld identiek zijn. Het spiegelbeeldmolecuul van figuur 12.49b is niet identiek aan het oorspronkelijke molecuul. Er zijn dus twee 'soorten' broomchloorfluormethaan. Deze stoffen hebben voor een groot deel overeenkomstige eigenschappen. Het smeltpunt, kookpunt en de oplosbaarheid zijn bijvoorbeeld identiek. Ook reageren ze in veruit de meeste reacties hetzelfde. De verschillen komen tot uiting in een omgeving waarbij de ruimtelijke bouw essentieel is. Dit kom je veel tegen in de biochemie. Je leert hier meer over in een later hoofdstuk.

Je noemt moleculen die niet identiek zijn aan hun spiegelbeeld **spiegelbeeldisomeren**. Het zijn stereo-isomeren, ze hebben dezelfde molecuulstructuur, maar een andere ruimtelijke bouw.

● Experiment 12.2

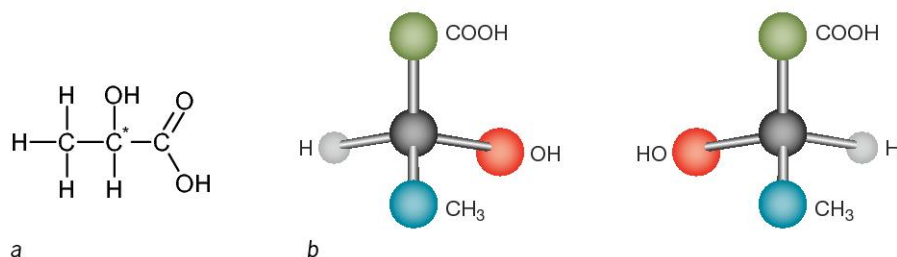


12.49 Het spiegelbeeld van broomchloormethaan is identiek aan het beeld (a). Het spiegelbeeld van broomchloorfluormethaan is niet identiek aan het beeld.

Asymmetrisch koolstofatoom

Zoals je in figuur 12.49b kunt zien heeft het C-atoom in broomchloorfluormethaan vier verschillende groepen. Een C-atoom met vier verschillende groepen eraan noem je een **asymmetrisch C-atoom**. Wanneer een molecuul een asymmetrisch C-atoom bevat, heeft het spiegelbeeldisomeren.

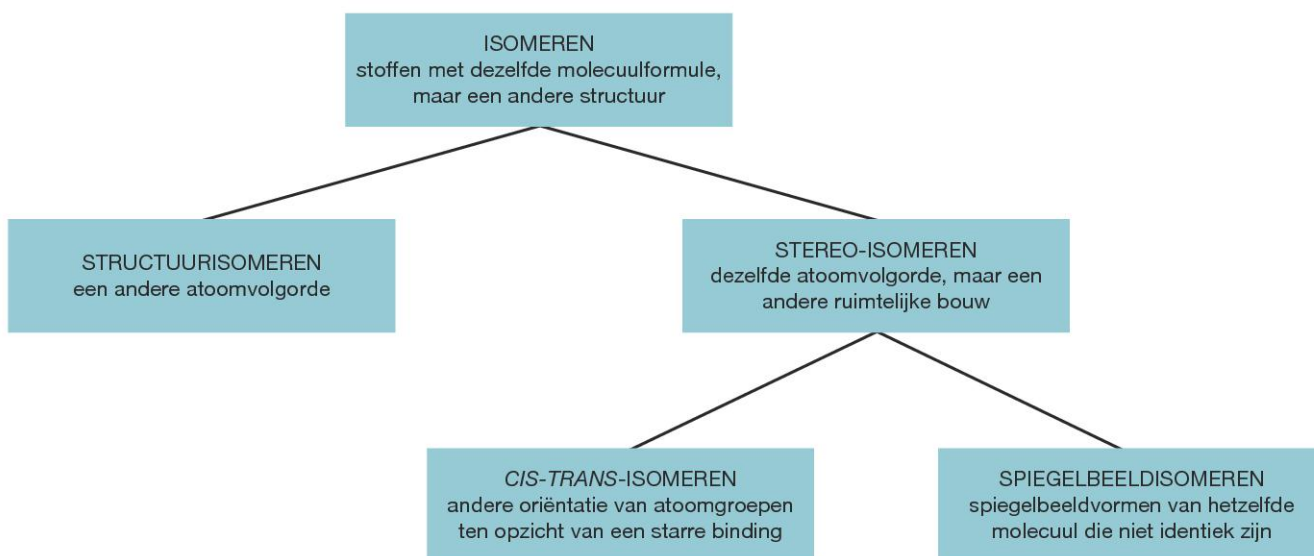
Vaak zie je een asymmetrisch C-atoom weergegeven als C*, zoals je in figuur 12.50a hieronder kunt zien in de structuurformule van melkzuur. Er bestaan dus twee spiegelbeeldisomeren van melkzuur (figuur 12.50b).



12.50 Asymmetrische koolstofatomen geef je aan met een ster (a). Van melkzuur bestaan twee spiegelbeeldisomeren (b).

- Experiment 12.3
- Experiment 12.4

Een overzicht van de verschillende vormen van isomerie vind je in figuur 12.51.



12.51 Overzicht van de verschillende vormen van isomerie.

Samenvatting

- Structuurisomeren zijn isomeren met een verschillende atoomvolgorde. Stereoisomeren zijn isomeren met dezelfde atoomvolgorde, maar een andere ruimtelijke bouw.
- Voor *cis-trans*-isomerie moeten er zowel aan de linker- als de rechterzijde van een starre binding twee verschillende groepen aan de koolstofatomen zijn gebonden. Bij de *cis*-vorm zitten de groepen aan één kant van de starre binding. Bij de *trans*-vorm zitten de groepen tegenover elkaar.
- Moleculen waarvan het spiegelbeeld niet identiek is aan het oorspronkelijke molecuul zijn spiegelbeeldisomeren. Spiegelbeeldisomerie is een vorm van stereo-isomerie.
- Spiegelbeeldisomerie komt voor bij moleculen met een asymmetrisch koolstofatoom. Een asymmetrisch C-atoom is een C-atoom waaraan vier verschillende groepen zijn gebonden.

Sturende sterren

Aminozuren zijn één van de belangrijkste bouwstenen die leven mogelijk maken. Aminozuren kunnen aan elkaar worden gekoppeld, waardoor eiwitten ontstaan. Deze eiwitten zijn verantwoordelijk voor het regelen van allerlei reacties in je lichaam.

Er bestaan twintig verschillende aminozuren die worden gebruikt voor het vormen van eiwitten. Op één na bestaan er van al deze aminozuren twee (of meer) spiegelbeeldisomeren. Je spreekt dan van linksdraaiende en rechtsdraaiende aminozuren.

Deze vorm van stereo-isomerie is een van de redenen dat eiwitten zeer selectief zijn met welke stoffen ze wel of geen reactie aangaan. Net zoals je linkerhand alleen in een linkerhandschoen past, kunnen eiwitten maar met één van beide spiegelbeeldisomeren reageren.

Chemici van de Radboud Universiteit Nijmegen hebben een scheidingsmethode ontwikkeld om aminozuurachtige stoffen te scheiden in de twee spiegelbeeldisomeren. Het scheiden van spiegelbeeldisomeren is enorm lastig, omdat de isomeren qua chemische en fysische eigenschappen zoals kookpunt en oplosbaarheid identiek aan elkaar zijn.

Of de onderzoekers uit het scheidingsproces de links- of rechtsdraaiende variant kregen, was in eerste instantie toeval. Door echter tijdens de kristallisatie het mengsel te bestralen met gepolariseerd licht, kunnen ze nu zelf bepalen of de linksdraaiende of de rechtsdraaiende isomeer ontstaat.

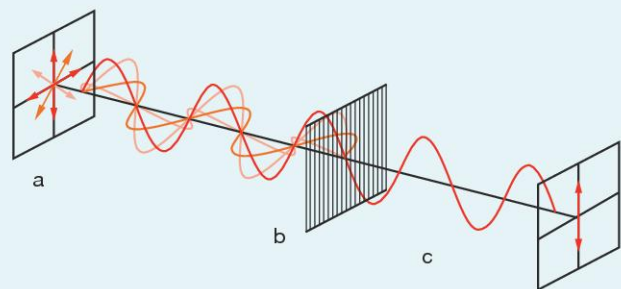
Gepolariseerd licht is licht waarvan de trillingen maar in één vlak bewegen (zie figuur 12.52). Stoffen die spiegelbeeldisomerie vertonen zijn in staat om de trillings-

richting van gepolariseerd licht te draaien. Je noemt deze stoffen daarom ook wel optisch actief.

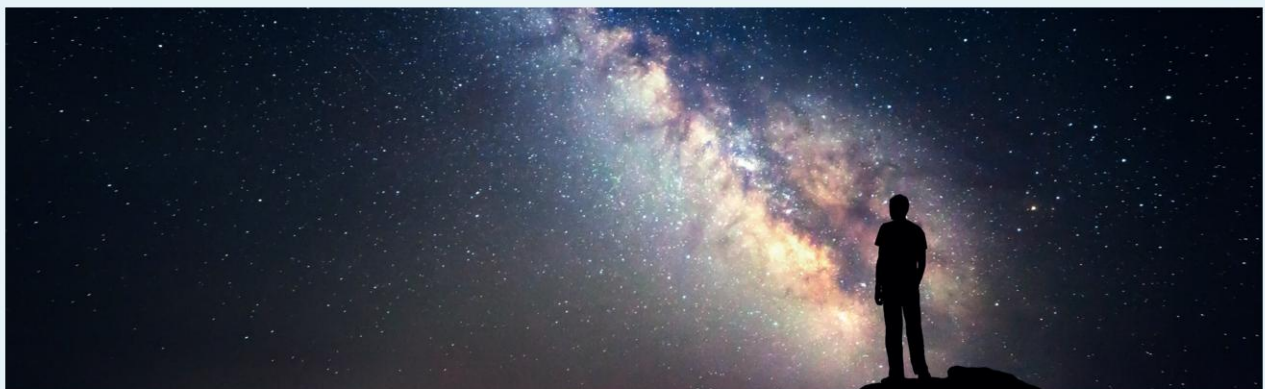
Met hun bestralingstechniek denken de onderzoekers ook een vraagstuk opgelost te hebben waar wetenschappers zich al jaren over buigen. In levende wezens blijkt dat er vrijwel altijd maar een van de twee spiegelbeeldisomeren voorkomt. Op de vraag waarom de natuur zo 'stereospecifiek' is, is nog steeds geen definitief antwoord gevonden.

Maar het gepolariseerde licht dat wordt gebruikt bij het scheidingsproces wordt ook uitgestraald door sterren aan het begin van hun levenscyclus. Wellicht hebben die sterren ervoor gezorgd dat er bij het ontstaan van leven alleen één soort aminozuren ontstonden (figuur 12.53). Of dit daadwerkelijk de oplossing is, vraagt nog om verder onderzoek. Aan de Radboud Universiteit wordt de de scheidingsmethode nu ook toegepast op simpele moleculen die aanwezig waren bij het begin van het leven.

Bron: NEMO Kennislink



12.52 Bij natuurlijk licht bewegen de trillingen in alle richtingen (a). Met een polarisatiefilter (b) kun je licht maken dat nog maar in één vlak trilt (c).



12.53 Is sterrenlicht verantwoordelijk voor het ontstaan van maar één spiegelbeeldisomeer van aminozuren?

● Opdracht C57

Opdrachten

A 46

- a** Geef aan wat wordt bedoeld met een starre binding.
b Geef aan waarom er bij een alkaan nooit sprake kan zijn van *cis-trans* isomerie.

A 47

- a** Welke twee vormen van stereo-isomerie ken je?
b Leg uit wat een asymmetrisch C-atoom is.

A 48

Geef aan wat het verschil is tussen een structuurisomeer en een stereo-isomeer.

B 49

Leg uit waarom een C-atoom van een zuurgroep nooit asymmetrisch is.

B 50

Leg uit waarom er bij een drievoudige binding geen *cis-trans*-isomerie kan voorkomen.

B 51

Van welke van de volgende verbindingen bestaan *cis*- en *trans*-isomeren? Licht je antwoord toe met structuurformules.

- a** 1,1-dichlooretheen
b 1,2-dibroometheen
c 2-methylpent-1-een
d 3-chloorhex-3-een
e cyclohexeen
f penta-1,3-dieen
g 1-chloor-2-methylbuta-1,3-dieen

B 52

Welke van de volgende verbindingen vertonen spiegelbeeldisomerie? Teken van alle verbindingen de structuurformule en geef daarin asymmetrische C-atomen aan met *.

- a** 2-chloorpropaan-1-ol
b 1-chloor-3-methylbenzeen
c 2-methylbut-1-een
d 1-fenyl-1-chloorethaan
e 3-methylhexaan
f 3-ethylheptaan

B 53

Bij de additie van chloor aan ethyn ontstaan er twee stoffen.

- a** Teken van beide stoffen de structuurformule en geef de systematische naam.

Bij de additie van waterstofchloride aan 1-chloorethyn ontstaan er drie stoffen.

- b** Teken van alle drie de structuurformule.

B 54

Hieronder staan enkele klassen van verbindingen. Teken de structuurformule van het kleinste molecuul van elke klasse dat spiegelbeeldisomerie vertoont.

- a** alkanolen
b alkaanzuren
c alkaandiolen
d alkanen
e alkenen
f aromatische koolwaterstoffen

B 55

De structuurformule van de stof serine kun je vinden in Binas tabel 67H1.

- a** Neem de structuurformule over en geef het asymmetrische koolstofatoom weer met *.

Van alle twintig aminozuren in de tabel vertoont er maar één geen spiegelbeeldisomerie.

- b** Leg uit welk aminozuur dit is en waarom het geen spiegelbeeldisomerie vertoont.

B 56

- a** Teken de structuurformule van dibroommethaan en leg uit waarom er geen sprake is van spiegelbeeldisomerie.
b Teken de structuurformule van broomchloormethaan en leg uit waarom er geen sprake is van spiegelbeeldisomerie.
c Teken de structuurformule van 2-broom-2-fluor-butaan en leg uit waarom er wel sprake is van spiegelbeeldisomerie.

C 57 ★

Lees de tekst in het kader 'Sturende sterren' en beantwoord de volgende vragen.

In hoeverre een optisch actieve stof de trillingsrichting van gepolariseerd licht draait, is afhankelijk van de afstand die het licht aflegt door de stof (l), de concentratie van de stof (c) en een evenredigheidsconstante ($[\alpha]$). Dit kun je uitdrukken in een formule:

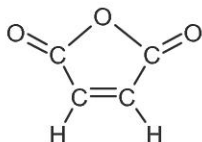
$$\alpha = [\alpha] \times l \times c$$

Hierin is α de draaihoek in graden $^{\circ}$, $[\alpha]$ de evenredigheidsconstante in $^{\circ} \text{ mL dm}^{-1} \text{ g}^{-1}$, l de weglengte in dm en c de concentratie in g mL^{-1} .

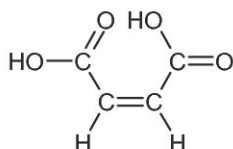
In een experiment wordt de concentratie sacharose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) in een oplossing bepaald door de draaihoek van gepolariseerd licht te meten. Hierbij wordt een weglengte van 1 dm gebruikt. De gemeten draaihoek is $10,2^{\circ}$. Voor de stof sacharose geldt dat $[\alpha] = 66,4^{\circ} \text{ mL dm}^{-1} \text{ g}^{-1}$. Bereken de molariteit van de sacharose in deze oplossing.

C 58

MZA is een grondstof voor veel soorten kunststoffen, onder andere polyesters. De structuurformule van MZA is als volgt:



MZA kan worden verkregen uit een stof met de volgende formule:



Bij deze bereiding van MZA reageren van het bovenstaande molecuul twee OH-groepen met elkaar onder vorming van een molecuul MZA. Tevens wordt daarbij een molecuul water gevormd. Een dergelijke reactie kan niet optreden met de stereo-isomeer van de bovenstaande stof.

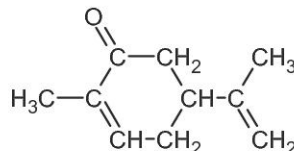
- Geef de systematische naam van de bovenstaande stof en de systematische naam van de stereo-isomeer hiervan.
- Geef de structuurformule van de stereo-isomeer en leg aan de hand hiervan uit waarom de beide OH-groepen uit een molecuul van die stereo-isomeer niet met elkaar kunnen reageren.

Naar: CE vwo 2006-I

C 59

Hoog in je neusholte (in het reukepitheel) bevinden zich eiwitmoleculen waarmee je geurstoffen herkent. Deze eiwitmoleculen noem je receptoren.

Karwijzaadolie wordt wel gebruikt als geur- en smaakstof in likeuren, cosmetica en dergelijke. Deze olie bestaat voor ongeveer 50% uit een spiegelbeeldisomeer van de volgende verbinding, die verantwoordelijk is voor de specifieke geur:



Uit de plant herts-munt kan de andere spiegelbeeldisomeer van de bovenstaande verbinding worden geïsoleerd. Dit is ook een geurstof, maar de geuren van beide isomeren zijn door je reukorgaan duidelijk te onderscheiden.

- Geef de molecuulformule van bovenstaande verbinding.
- Leg uit waarom de bovenstaande verbinding twee spiegelbeeldisomeren heeft.
- Hoe zou je het verschil in geur van de twee spiegelbeeldisomeren kunnen verklaren?

Experimenten

12.1 *Cis-trans*-isomerie

Je kijkt door molecuulmodellen te bouwen naar *cis-trans*-isomerie.

12.2 Spiegelbeeldisomeren

Je bouwt molecuulmodellen met asymmetrische C-atomen en kijkt naar spiegelbeeldisomerie.

12.3 Polaroid

Je polariseert licht met polaroidfilters.

12.4 Polarimeter

Met een polarimeter doe je metingen aan suikeroplossingen.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

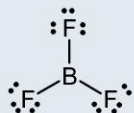
- uitleggen wat het verschil is tussen structuurisomerie en stereo-isomerie;
- *cis*- en *trans*-isomerie herkennen en benoemen;
- uitleggen hoe spiegelbeeldisomeren van elkaar verschillen;
- aan een structuurformule herkennen of er spiegelbeeldisomeren mogelijk zijn.

Afsluiting

Oefenopdrachten

1

Hiernaast zie je de lewisstructuur van boortrifluoride.



a Leg uit of alle atomen van boortrifluoride voldoen aan de octetregel.

b Voorspel met behulp van het omringingsgetal de ruimtelijke bouw van boortrifluoride.

Boortrifluoride en ammoniak reageren gemakkelijk met elkaar tot een verbinding met molecuulformule H_3NBF_3 .

c Geef de vergelijking van deze reactie in lewisstructuren.

d Leg uit of deze reactie een additiereactie, substitutiereactie of ander soort reactie is.

e Geef een verklaring voor het optreden van deze reactie. Gebruik in je antwoord de termen elektrofiel en nucleofiël.

2

Er bestaan twee stereo-isomeren van buteendizuur. Het *cis*-isomeer noem je ook wel maleïnezuur, het *trans*-isomeer heet fumaarzuur. Fumaarzuur komt voor in de gewone duivenkervel, een plant met een geneeskrachtige werking, zie figuur 12.54.

a Teken de structuurformule van maleïnezuur en van fumaarzuur.

De twee isomeren hebben door de andere ruimtelijke bouw heel verschillende stoffeïenschappen. Zo is maleïnezuur oplosbaar in water en fumaarzuur niet. Ook het smeltpunt verschilt enorm. Maleïnezuur smelt bij 137°C en fumaarzuur bij 287°C . Dit verschil is te verklaren door veel efficiëntere intermoleculaire interacties. De moleculen van fumaarzuur zijn veel beter ‘stapelbaar’ dan die van maleïnezuur. Bovendien kan maleïnezuur een inwendige waterstofbrug vormen.

b Leg uit waarom maleïnezuur wel een inwendige waterstofbrug kan vormen en fumaarzuur niet.

c Leg uit waarom het vormen van inwendige waterstofbruggen het smeltpunt verlaagt.

Ook de zure eigenschappen van de stoffen verschillen, waardoor de K_z van beide stoffen anders is. De K_z van maleïnezuur is $1,2 \cdot 10^{-2}$, de K_z van fumaarzuur is $9,6 \cdot 10^{-4}$.

d Bereken de pH van een 0,10 M oplossing van maleïnezuur.

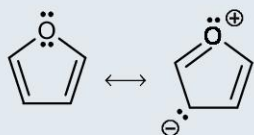


12.54 De gewone duivenkervel



12.55 Furan is een stof die met name in koffiecups zit. Het is onderdeel van de vluchtige aromastoffen die ontstaan bij het branden van groene koffiebonen.

- 3** Cyclische moleculen waarvan de ring(en) niet alleen koolstofatomen bevat(ten), noem je heterocyclische moleculen. Furan is een stof met heterocyclische moleculen (figuur 12.55). Hieronder zie je twee grensstructuren van furan.



Er zijn nog drie andere grensstructuren van furan.

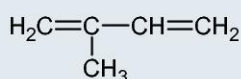
- Geef met verplaatsende elektronenparen in de vorm van pijltjes aan hoe uit de linkerstructuur hierboven de rechterstructuur ontstaat.
- Teken de lewisstructuren van de drie andere grensstructuren van furan.

Furan is net als benzeen een aromatische verbinding.

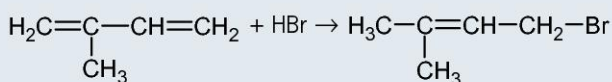
- Leg aan de hand van elektronenverplaatsingen en dubbele bindingen uit wat furan en benzeen met elkaar op microniveau gemeen hebben.
- Geef de molecuulformule van furan.

4 Terpenen

Isopreen, de belangrijkste grondstof voor synthetisch rubber (figuur 12.56), is de triviale naam van de stof met onderstaande structuurformule:



Isopreen kan met waterstofbromide reageren. Daarbij treedt additie op. Dit kan op twee manieren: 1,2-additie en 1,4-additie. Hieronder zie je een reactie van isopreen en HBr.



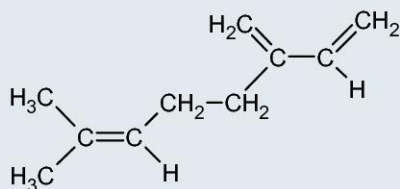
- Geef de systematische naam van het reactieproduct.
- Leg uit of er 1,2-additie of 1,4-additie heeft plaatsgevonden.



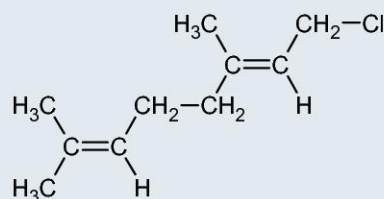
12.56 Naast allerlei praktische toepassingen kun je van rubber ook een prima bal maken.

In veel planten komen koolwaterstoffen voor die je terpenen noemt. Terpenen hebben de molecuulformule $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$. Je kunt je indenken dat een molecuul van een terpeen is ontstaan door onderlinge additie van twee moleculen isopreen. Een voorbeeld van een terpeen is myrceen.

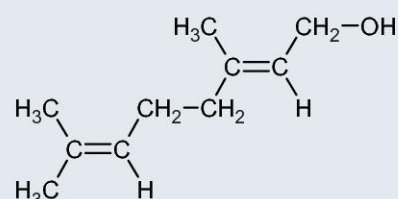
Myrceen dient als grondstof voor de bereiding van diverse geurstoffen. Een zo'n geurstof is geraniol, een stof die naar rozen ruikt. Bij de bereiding van geraniol uit myrceen wordt als tussenproduct onder andere geranylchloride gevormd. De structuurformules van myrceen, geranylchloride en geraniol zijn als volgt:



myrceen



geranylchloride



geraniol

De omzetting van myrceen tot geraniol verloopt in drie stappen.

Stap 1: Je laat myrceen in de molverhouding 1 : 1 met waterstofchloride reageren. Hierbij ontstaat een mengsel van chloriden, waaronder geranylchloride.

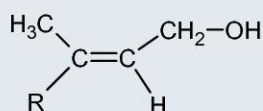
Stap 2: Het mengsel van chloriden dat in stap 1 is ontstaan, laat je reageren met natriumethanoaat. Het geranylchloride wordt hierbij omgezet tot geranylethanoaat, de ester van geraniol en ethaanzuur.

Stap 3: Door reactie met een oplossing van een stof X wordt het geranylethanoaat omgezet tot geraniol. Hierbij ontstaat behalve geraniol ook opgelost natriumethanoaat.

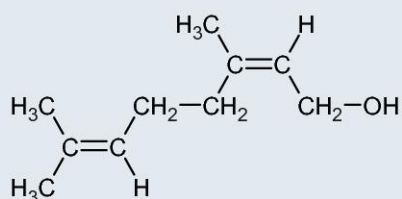
- c** Geef de naam van de stof X die in stap 3 wordt gebruikt.
- d** Geef de reactievergelijking voor de omzetting van geranylethanoaat tot geraniol. Gebruik hierin voor geraniol de onderstaande verkorte structuurformule en voor geranylethanoaat een vergelijkbare verkorte structuurformule.



12.57 Hoewel de stof nerol naar rozen ruikt, komt er in rozen geen nerol voor.

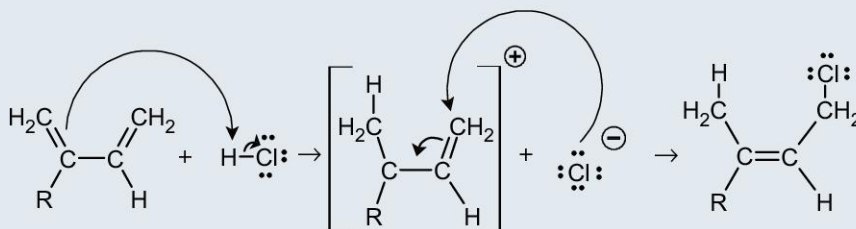


Behalve geraniol ontstaat bij deze bereiding ook de stereo-isomeer van geraniol, nerol. Deze stof ruikt ook naar rozen (figuur 12.57). Nerol wordt ook wel *cis*-geraniol genoemd. De structuurformule van nerol is hieronder weergegeven:



Het ontstaan van nerol kan worden verklaard met behulp van het reactiemechanisme van stap 1. Voor het verloop van stap 1 is het volgende reactiemechanisme voorgesteld.

Bij de additie van een waterstofchloridemolecuul aan een molecuul myrceen wordt eerst een H^+ -ion aan het myrceenmolecuul gebonden. Daarna wordt aan het ontstane positieve ion een Cl^- -ion gebonden, zie figuur 12.58.



12.58 Reactiemechanisme van de additie van waterstofchloride aan myrceen

In figuur 12.58 is met kromme pijlen aangegeven hoe achtereenvolgens het H^+ -ion en het Cl^- -ion worden gebonden en hoe de bindingen in het molecuul veranderen. Voor de structuurformule van myrceen is een verkorte schrijfwijze gebruikt.

- e** Leg uit hoe je het ontstaan van nerol kunt verklaren met het in figuur 12.58 gegeven reactiemechanisme voor de vorming van geranylchloride.

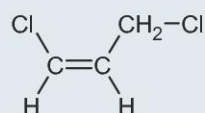
Naar: CE vwo 2005-II



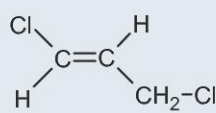
5 Jaar in jaar uit aardappelen verbouwen op hetzelfde stuk grond is niet goed omdat in de grond het aantal organismen (aaltjes) die de aardappelen aantasten, toeneemt. Door gebruik te maken van grondontsmettingsmiddelen (figuur 12.59) worden de aaltjes bestreden, zodat je wel vaker aardappelen kunt telen op hetzelfde stuk grond. Een grondontsmettingsmiddel dat je tegen aaltjes kunt gebruiken heet in deze opgave verbinding A.



12.59 Grondontsmetting om schadelijke organismen in landbouwgrond te bestrijden.



verbinding A



verbinding B

- a** Geef de systematische naam van verbinding A.

Verbinding A en verbinding B worden gevormd als Cl_2 onder bepaalde omstandigheden met $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ reageert.

- b** Leg uit of de reactie tussen Cl_2 en $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ waarbij verbinding A ontstaat, een substitutiereactie is.
c Noem een van de vereiste reactieomstandigheden die nodig is om verbinding A te maken.

Hoewel alleen verbinding A werkzaam is tegen aaltjes, werd jarenlang een mengsel van verbinding A en verbinding B gebruikt als grondontsmettingsmiddel tegen aaltjes. Uit onderzoek is gebleken dat zowel verbinding A als verbinding B enigszins giftig is voor de mens. De giftige eigenschappen zijn echter zo gering dat men het risico voor gebruikers en omwonenden verwaarloosbaar klein acht. Daarom mag verbinding A wel worden gebruikt, maar zijn mengsels van verbinding A en verbinding B verboden.

Mengsels van verbinding A en verbinding B die bij de bereiding van het ontsmettingsmiddel ontstaan, moeten dus worden gescheiden. Destillatie is een scheidingsmethode die je vaak kunt toepassen om een mengsel van verbindingen te scheiden. Er bestaan echter mengsels van stereo-isomeren die je niet kunt scheiden door middel van destillatie.

- d** Leg uit bij welk soort stereo-isomeren een mengsel zeker niet door middel van destillatie is te scheiden.
e Leg uit of je mag verwachten dat een mengsel van verbinding A en verbinding B door middel van destillatie is te scheiden.
f Geef op basis van bovenstaande gegevens een argument dat de wetgever kan hebben gebruikt om het gebruik van mengsels van verbinding A en verbinding B te verbieden.

6

Tetrahydrofuraan

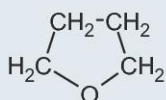
Er bestaan diverse verbindingen met de molecuulformule $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, bijvoorbeeld alkanalen.

- a** Geef de structuurformules van alle alkanalen met de molecuulformule $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$.



12.60 Het is nog niet eenvoudig om een vijver aan te leggen. Voor het verlijmen van het vijverfolie kun je tetrahydrofuran gebruiken.

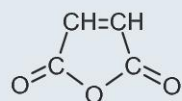
Er zijn ook verbindingen met de molecuulformule C_4H_8O die zijn op te vatten als cyclische ethers. In een cyclische ether bevat de ring van een molecuul behalve koolstofatomen, ook een zuurstofatoom. Een voorbeeld van een cyclische ether met de molecuulformule C_4H_8O is tetrahydrofuraan. Deze verbinding heeft de volgende structuurformule:



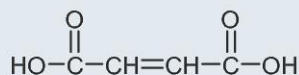
Een molecuul tetrahydrofuraan bevat een vijftring. Er bestaan drie cyclische ethers met de molecuulformule C_4H_8O waarvan de moleculen een vierring bevatten; twee van die verbindingen zijn spiegelbeeldisomeren van elkaar.

- b** Leg met behulp van structuurformules uit welke drie cyclische ethers met de molecuulformule C_4H_8O dat zijn. Laat ook zien waarom slechts een van de twee structuurisomeren een spiegelbeeldisomeer heeft.

De verbinding tetrahydrofuraan wordt in een fabriek volgens een continuproces gemaakt uitgaande van buteendizuuranhydride ($C_4H_2O_3$), zie figuur 12.61. De omzetting van buteendizuuranhydride in tetrahydrofuraan vindt plaats via buteendizuur.



buteendizuuranhydride



buteendizuur

Deze verbinding wordt in een reactor gevormd door de reactie van buteendizuuranhydride met water. Bij deze reactie wordt in een molecuul buteendizuuranhydride de $\text{C}=\text{C}$ -binding niet verbroken. Er zijn twee verbindingen buteendizuur bekend. Slechts een daarvan wordt bij de reactie van buteendizuuranhydride met water gevormd.

- c** Met welke aanduiding in de naam wordt het buteendizuur dat bij deze reactie wordt gevormd, onderscheiden van het andere buteendizuur?
- d** Leg uitgaande van de structuur van een molecuul buteendizuuranhydride uit hoe je moet verklaren dat het andere buteendizuur bij deze reactie niet wordt gevormd.



12.61 Buteendizuuranhydride is een belangrijke grondstof voor de productie van glasvezelversterkte plastics. Dit vliegtuig, de Fairchild F-46, was waarschijnlijk het eerste vliegtuig dat gebruikmaakte van deze vorm van plastic.

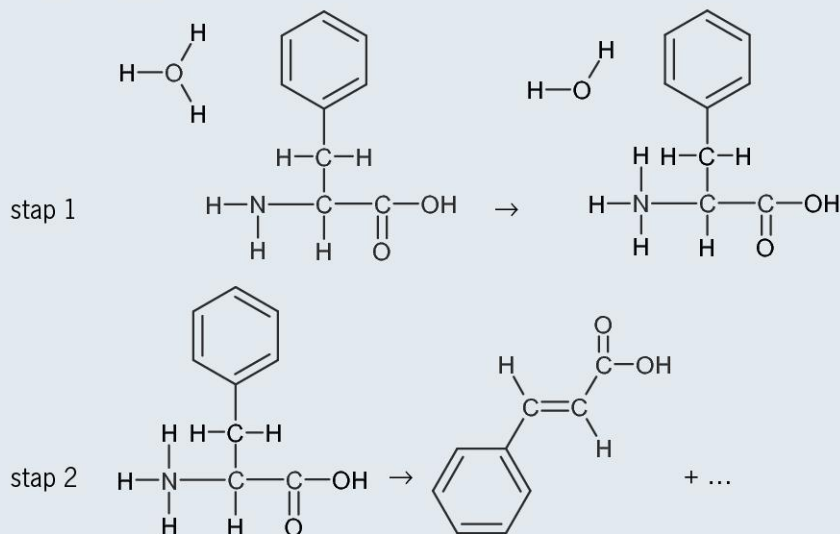


7

Fenylalanine is een aminozuur dat eenvoudig kan worden omgezet tot kaneelzuur (figuur 12.62). In een oplossing van fenylalanine waaraan zwavelzuur wordt toegevoegd verloopt de omzetting tot kaneelzuur. Het reactiemechanisme van deze omzetting is hieronder onvolledig weergegeven.



12.62 Kaneelzuur kan ook worden verkregen uit de olie van kaneel.



Neem het mechanisme over en:

- vul de structuren aan tot lewisstructuren (inclusief formele ladingen);
- geef de elektronenverplaatsing aan met pijlen;
- vul de structuurformule van het ontbrekende deeltje in.

Keuzeopdrachten

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

1

Van 't Hoff: geniaal en bescheiden

Van 't Hoff had eigenlijk de Nobelprijs moeten krijgen voor het bedenken van de tetraëdrische omringing van het koolstofatoom. Hij kreeg de Nobelprijs ook, maar voor een heel ander onderdeel van zijn werk. Je zoekt in deze opdracht uit wie Van 't Hoff was en wat zijn betekenis voor de chemie is geweest.

2

De chemie van het zien

Het optreden van *cis-trans*-isomerie speelt een belangrijke rol bij het proces dat ten grondslag ligt aan ons gezichtsvermogen. Je leert ook iets over het verband met je voeding. Hoe dat zit ontdek je in deze keuzeopdracht.

3

De polarimeter

Een polarimeter is een apparaat waarmee je de optische activiteit van stoffen kunt meten. In deze keuzeopdracht doe je met de polarimeter metingen aan een suikeroplossing.

Overzicht begrippen

Additiereactie	Bij een additiereactie ontstaat uit twee of meer moleculen één nieuw molecuul. Vaak is voor een additiereactie een dubbele of drievoudige binding nodig. Bij koolwaterstoffen met twee dubbele bindingen, gescheiden door één enkele binding zijn twee vormen van additie mogelijk. Als het toegevoegde molecuul bindt aan de atomen rond één dubbele binding, dan spreek je van 1,2-additie. Als het toegevoegde molecuul bindt aan de buitenste atomen, dan spreek je van 1,4-additie.
Elektronenpaar	Elektronen komen rond een atoom in paren voor. Als het elektronenpaar wordt gedeeld tussen twee atomen, dan spreek je van een bindend elektronenpaar. Zo niet, dan is het een vrij elektronenpaar.
Dipool	Een molecuul met partiële ladingen en een duidelijke positieve en negatieve kant is een dipool. Dipoolmoleculen kunnen onderling dipool-dipoolbindingen vormen.
Lewisstructuur	Een structuurformule waarin alle valentie-elektronen worden weergegeven is een lewisstructuur. De lading van de individuele atomen in een lewisstructuur is de formele lading. Het aantal elektronenparen rond een atoom heet het omringingsgetal. Met het omringingsgetal kun je de ruimtelijke bouw van een molecuul voorspellen (VSEPR-methode).
Mesomerie	Van sommige verbindingen kun je meerdere lewisstructuren tekenen. Dit verschijnsel is mesomerie. De verschillende structuren zijn grensstructuren. Hoe meer grensstructuren er zijn van een verbinding, hoe stabielere de verbinding. De structuren bestaan niet op zichzelf, maar de stof is een combinatie van alle grensstructuren.
Radicaal	Een molecuul of ion met een oneven aantal valentie-elektronen heet een radicaal. Radicalen zijn zeer reactief.
Reactiemechanisme	Een weergave van een chemische reactie in meerdere deelstappen is een reactiemechanisme. Een reactiemechanisme kan ionair of radicaal zijn. De eerste stap in een radicaalmechanisme is de initiatie, hierbij worden radicalen gevormd. De volgende stap is de propagatie. De laatste stap is de terminatie. Deeltjes in het mechanisme die negatief zijn geladen of veel vrije elektronenparen hebben zijn nucleofiel. Positief geladen deeltjes zijn elektrofiel.
Substitutiereactie	Een chemische reactie waarbij een atoom of atoomgroep wordt vervangen door een andere atoom of atoomgroep.
Stereo-isomerie	Moleculen waarvan de atoomvolgorde identiek is, maar die een andere ruimtelijke bouw hebben zijn stereo-isomeren. Rond een dubbele binding kan er sprake zijn van cis-trans-isomerie. Als er in het molecuul een C-atoom voorkomt met vier verschillende groepen, een asymmetrisch C-atoom, dan is er vaak sprake van spiegelbeeldisomerie.
Uitgebreid octet	Bij sommige verbindingen voldoen de atomen niet aan de octetregel. Als een atoom door meer dan acht elektronen is omringd, heet dit een uitgebreid octet.

13 Kunststoffen

Inhoud

- 13.1** Additiepolymerisatie
Experimenten:
 - 13.1 Perspex maken
 - 13.2 Polystyreen maken
 - 13.3 Verdwijnt piepschuim?
- 13.2** Condensatiepolymerisatie
Experiment:
 - 13.4 Nylon
- 13.3** Eigenschappen
Experimenten:
 - 13.5 Polyurethaanschuim
 - 13.6 Kunststoffen herkennen

Afsluiting

Overzicht begrippen





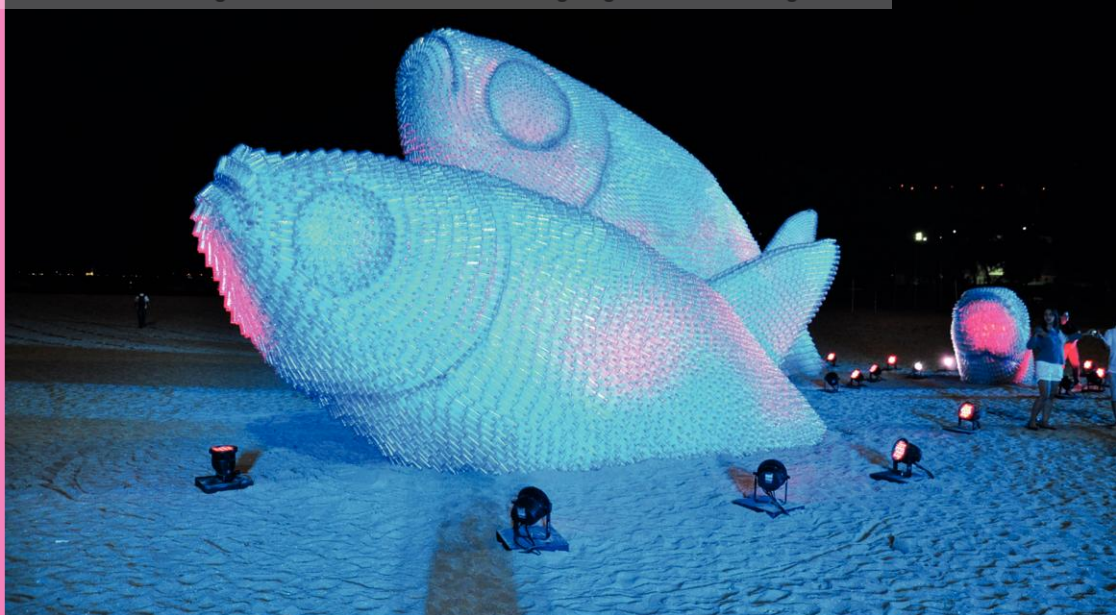
Polyester sculpturen

De grote vogelsculptuur in Duisburg, Duitsland is van de Franse kunstenares Niki de Saint Phalle. Zij was een van de eerste kunstenaars die beelden van polyester maakte. Polyester is een kunststof die niet meer weg te denken is uit het dagelijks leven.

13

Polyetheen

De stof polyetheen kent veel verschillende toepassingen. Hij wordt gebruikt voor kunststof zakjes, flesjes en als beschermingsmantel voor elektriciteitsdraden. Polyetheen is slecht afbreekbaar in het milieu, maar wel goed te recyclen. Een bijzondere manier van recyclen is dit kunstwerk op het strand van Rio de Janeiro dat is gemaakt van weggegooides flesjes.



Je leert

- wat monomeren en polymeren zijn;
- hoe je polymeren kunt maken door middel van additiepolymerisatie.

13.1 Additiepolymerisatie

Polymeren en monomeren

Kunststoffen zijn materialen die niet meer zijn weg te denken uit de huidige maatschappij, maar dat betekent ook dat er een enorm afvalprobleem is ontstaan. Hergebruik zoals in het kunstwerk in Rio de Janeiro en recycling zoals bijvoorbeeld in bouwmaterialen worden steeds belangrijker.

Kunststoffen zijn vaste stoffen doordat de moleculen waar de kunststof uit bestaat heel groot zijn en de vanderwaalskrachten dus sterk zijn. Ze ontstaan wanneer kleine moleculen worden gekoppeld tot hele lange ketens of grote netwerken.



13.1 Polystyreen wordt veel gebruikt in de bouw. Door het toevoegen van een gas kun je de kunststof polystyreen enorm laten uitzetten en krijg je piepschuim.

Kunststoffen zijn **polymeren** ('poly' betekent veel), maar niet alle polymeren zijn kunststoffen. Eiwitten die in hoofdstuk 16 worden behandeld zijn bijvoorbeeld ook polymeren, maar geen kunststoffen. Je noemt de kleine moleculen waar het polymeer uit is opgebouwd **monomeren**. Het monomeer geeft de kunststof vaak zijn naam. De kunststof die wordt gemaakt van het monomeer styreen heet bijvoorbeeld polystyreen (figuur 13.1). Polyvinylchloride (pvc) wordt gemaakt van vinylchloride.

Het koppelen van monomeren kan op twee verschillende manieren, namelijk via een **additiepolymerisatie** of via een **condensatiepolymerisatie**. Additiepolymerisatie bespreken we nu en condensatiepolymerisatie behandelen we in de volgende paragraaf.

Additiepolymerisatie

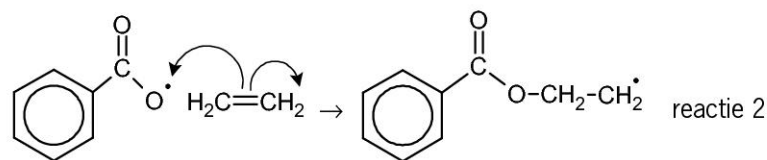
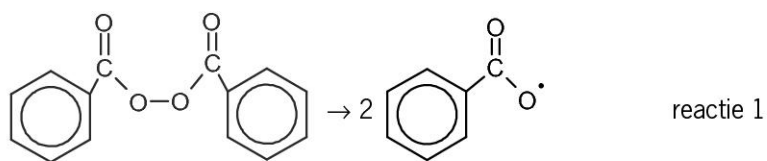
In paragraaf 12.4 heb je al gezien dat een additiereactie volgens een radicaalmechanisme en een ionair mechanisme kan verlopen. Het additiepolymerisatieproces verloopt op een vergelijkbare manier. We bespreken hier een polymerisatieproces dat via een radicaalmechanisme verloopt en gebruiken als voorbeeld de synthese van polyetheen. Polyetheen wordt gemaakt uit het monomeer etheen. Het proces verloopt in drie stappen.



13.2 Benzoylperoxide is niet alleen een industriële initiator, maar ook een beproefd middel tegen acne.

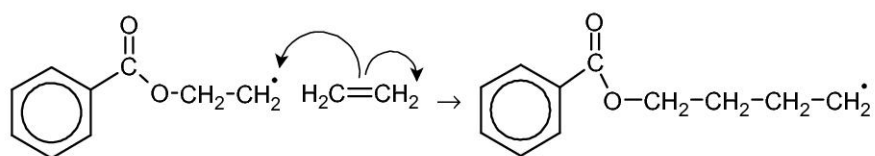
Stap 1: Initiatie

De reactie wordt opgestart door het vormen van radicaalmoleculen. Dit kan bijvoorbeeld door de stof benzoylperoxide te verwarmen, zie reactie 1. Er ontstaan dan twee radicalen die de reactie kunnen starten. Dit gebeurt in reactie 2.

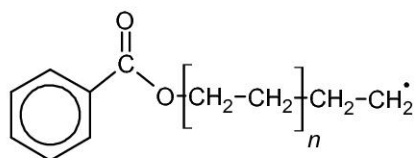


Stap 2: Propagatie

De radicaalmoleculen reageren weer met etheenmoleculen, waarbij de keten langer wordt.



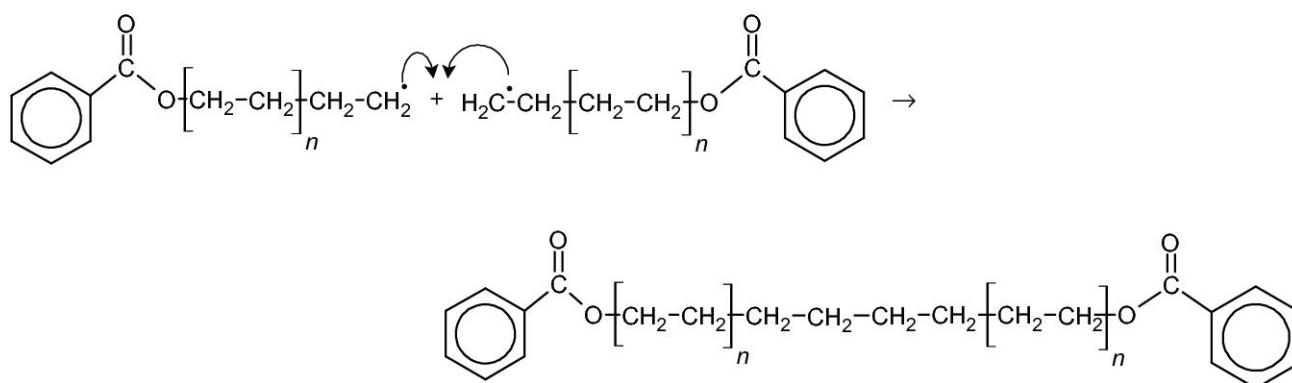
Dit proces herhaalt zich vele malen. Er wordt steeds een etheenmolecuul aan de keten toegevoegd. Deze keten kun je weergeven als:



Hierin is het fragment tussen de haakjes de repeterende eenheid en dat komt in deze structuur n keer voor. Deze repeterende eenheid noem je de **monomeereenheid**.

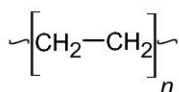
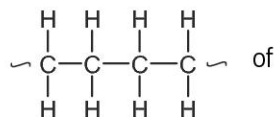
Stap 3: Terminatie

De reactie stopt wanneer twee radicaalmoleculen met elkaar reageren. Op deze manier ontstaat het **additiepolymeer** dat is weergegeven in figuur 13.3.



13.3 Het additiepolymeer van etheen

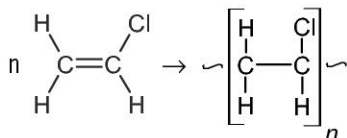
- Experiment 13.1
- Experiment 13.2
- Experiment 13.3



13.4 Verkorte weergave van polyetheen

Aan beide uiteinden van de ontstane polymeerketen bevindt zich een deel van het initiator-molecuul. Omdat de polymeerketens ontzettend lang zijn hebben deze nauwelijks invloed op de eigenschappen van de kunststof. Door meer of minder initiatormoleculen aan het reactiemengsel toe te voegen kun je sturen of er veel korte of lange polymeerketens ontstaan. In figuur 13.4 zie je twee manieren waarop de structuur van polyetheen verkort wordt weergegeven. De golfjes of zigzagjes aan het begin en eind van de structuurformule geven aan dat het molecuul nog verder doorloopt.

Vaak geef je het additiepolymerisatieproces eenvoudiger weer. Zo kun je de vorming van polychlooretheen (polyvinylchloride, pvc) als volgt weergeven:



13.5 Bankbiljetten uit Australië zijn gemaakt van polypropreen. Deze zijn moeilijker te vervalsen dan papieren bankbiljetten.

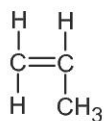
Voorbeeld

Teken een gedeelte van de structuurformule van een molecuul polypropreen (figuur 13.5). Teken hiervan drie monomeereenheden op een rij en zet golfjes op de uiteinden.

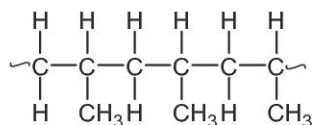
Propreen heeft als structuurformule:



De additiepolymerisatie vindt plaats aan de C-atomen ter weerszijde van de dubbele binding. Om fouten te voorkomen is het handig om de C-atomen waar de dubbele binding tussen zit horizontaal te tekenen. Alle andere atomen of groepen van atomen zet je eronder of erboven.



In de monomeereenheid komen geen dubbele bindingen meer voor. Hier zie je drie monomeereenheden in de keten weergegeven:



Samenvatting

- Kunststoffen bestaan uit heel grote moleculen: polymeren. Deze moleculen worden gemaakt uit kleine moleculen: monomeren. De naam van het polymeer is de naam van het monomeer met het woord poly ervoor. Polymeren kun je maken door additiepolymerisatie of door condensatiepolymerisatie.
- Het additiepolymerisatieproces verloopt in drie stappen: initiatie, propagatie, terminatie.
- Een monomeereenheid is de repeterende eenheid in het polymeer.

Opdrachten

A 1

- In etheen zit één dubbele binding. Hoeveel dubbele bindingen zitten in polyetheen?
- Hoe geef je het begin en het eind van een polymeer weer?
- Op welke twee manieren kunnen polymeren worden gemaakt?

A 2

Welke drie stappen kun je onderscheiden in het additie-polymerisatieproces?

B 3 **Teflon**

De stof teflon (polytetrafluoretheen) heeft bijzondere eigenschappen. Het reageert vrijwel nergens mee, is bestand tegen hoge temperaturen en is heel glad. Hierdoor kent de stof tal van toepassingen. Het wordt gebruikt als antiaanbaklaag, je kent vast wel het merk Tefal. Tefal is een combinatie van de woorden teflon en aluminium. In een Tefal pan is een laagje teflon op de aluminium pan aangebracht. Teflon wordt daarnaast gebruikt voor tape, om een waterafstotende laag op regenjassen aan te brengen en bij strijkijzers om ervoor te zorgen dat het strijkijzer makkelijker over de kleding glijdt. Het monomeer waaruit teflon wordt gemaakt heet tetrafluoretheen.

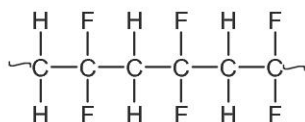
- Teken de structuurformule van tetrafluoretheen.
- Teken een gedeelte van de structuurformule van een molecuul polytetrafluoretheen. Geef hierin drie monomeereenheden weer.
- Leg aan de hand van de bovenstaande tekst uit of teflon gemakkelijk afbreekbaar is in het milieu.

Bij het recyclen van Tefalpannen worden de pannen versnipperd en daarna door verhitting gesmolten. De teflonlaag verbrandt dan. Er ontstaat daarbij een schadelijk gas.

- Leg uit welk schadelijk gas bij de verbranding van teflon kan ontstaan.

B 4

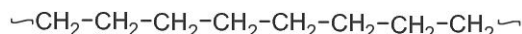
De structuurformule van de kunststof polyvinylideenfluoride kan als volgt worden weergegeven:



Geef de naam en de structuurformule van het monomeer waaruit deze stof wordt gemaakt.

B 5

Janneke moet van haar docent de structuurformule tekenen van het polymeer dat ontstaat bij de polymerisatie van but-2-een. Ze moet hierin twee monomeereenheden weergeven. Ze gaat aan de slag en tekent het volgende:



- Wat heeft Janneke verkeerd gedaan?
- Teken de juiste structuurformule van het polymeermolecuul. Geef hierin twee monomeereenheden weer.

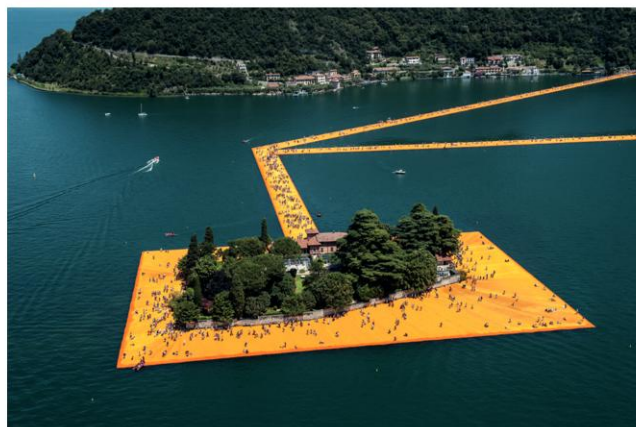
C 6

De stof polystyreen wordt veel gebruikt voor wegwerpbekertjes, frietbakjes en piepschuim, zie figuur 13.6. Het monomeer dat wordt gebruikt om polystyreen te maken heeft als triviale naam styreen. De systematische naam is fenyletheen.

- Teken de structuurformule van fenyletheen.

Het polymerisatieproces van de vorming van polystyreen uit styreen is weer te geven in de drie stappen: initiatie, propagatie en terminatie.

- Geef de initiatiestap in structuurformules weer, gebruik als formule voor de initiator R_2 .
- Geef de propagatiestap weer.
- Geef een terminatiestap weer.



13.6 Dit tijdelijke kunstwerk van Christo in het Lago d'Iseo in Italië is gemaakt van grote blokken piepschuim bedekt met een gekleurd folie.

C 7 ★

De stof acrylonitril is een zeer licht ontvlambare en extreem giftige vloeistof met de volgende structuurformule:



Deze stof wordt gemaakt door een reactie van propaan met ammoniak in aanwezigheid van zuurstof. Naast acrylonitril komt een andere stof vrij.

- a** Geef de vergelijking van deze reactie. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.

Acrylonitril wordt gebruikt als monomeer voor de productie van onder andere polyacrylonitril, een stof die wordt gebruikt als vezel.

- b** Teken de structuurformule van een gedeelte van een polyacrylonitrilmolecuul dat bestaat uit drie monomeereenheden.

Ook wordt de stof als monomeer gebruikt voor de productie van acrylonitril-butadien-styreen. Voor de productie van deze stof zijn ook twee andere monomeren nodig.

- c** Geef de naam en de structuurformule van de twee andere monomeren.



13.7 Van polybutadien worden autobanden gemaakt.

C 8

Polybuta-1,3-dien (figuur 13.7) is een synthetische rubber waarvan autobanden worden gemaakt. De structuren van de polymereenheden kunnen om twee redenen sterk uiteenlopen:

- naast 1,4-additie van buta-1,3-dien is ook 1,2-additie mogelijk.
- bij 1,4-additie kan het polymeer zowel *cis*- als *trans*-configuraties rond de dubbele bindingen in het polymeer hebben.

De stof *cis*-polybuta-1,3-dien kan ontstaan door 1,4-additie van buta-1,3-dien.

- a** Teken de structuurformule van een gedeelte van een *cis*-polybuta-1,3-dienmolecuul, dat bestaat uit twee monomeereenheden.
- b** Geef de structuurformule van een gedeelte van het polymereenheden dat ontstaat door 1,2-additie van buta-1,3-dien. Teken twee monomeereenheden.

Bij de polymerisatie van methylbuta-1,3-dien zijn er *drie* verschillende additiemogelijkheden: 1,4-, 1,2- en 3,4-additie.

- c** Leg uit hoe dit mogelijk is.

Experimenten

13.1 Perspex maken

In dit experiment zie je hoe de stof perspex wordt gemaakt.

13.2 Polystyreen maken

In dit experiment zie je hoe de stof polystyreen wordt gemaakt.

13.3 Verdwijnt piepschuim?

Wat is het volumepercentage lucht in piepschuim?

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat de begrippen monomeer, polymeer en monomeereenheid betekenen;
- een additiepolymerisatieproces weergeven met de begrippen initiatie, propagatie en terminatie;
- vanuit de structuur van een monomeer een gedeelte van de structuurformule van het polymeer weergeven;
- vanuit de structuur van een additiepolymeer de structuurformule van het monomeer weergeven.

Kevlar

De kunststof kevlar is enorm sterk en wordt onder andere gebruikt voor het verstevigen van motorkleding om de kans op verwondingen te verminderen en voor kogelwerende vesten.

De eigenschappen van het materiaal zijn een gevolg van de sterke atoombindingen in het polymeer en het onderling verbonden zijn van de polymeerketens door waterstofbruggen.

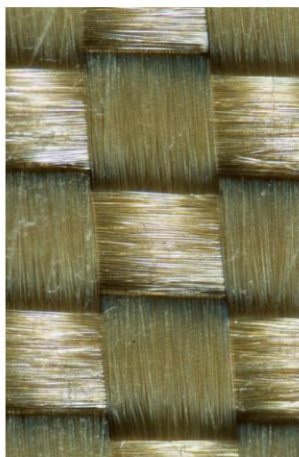
**Je leert**

- het reactiemechanisme van de condensatiereactie kennen;
- hoe bepaalde polymeren kunnen worden gemaakt door condensatiepolymerisatie.

13.2 Condensatiepolymerisatie

Kevlar

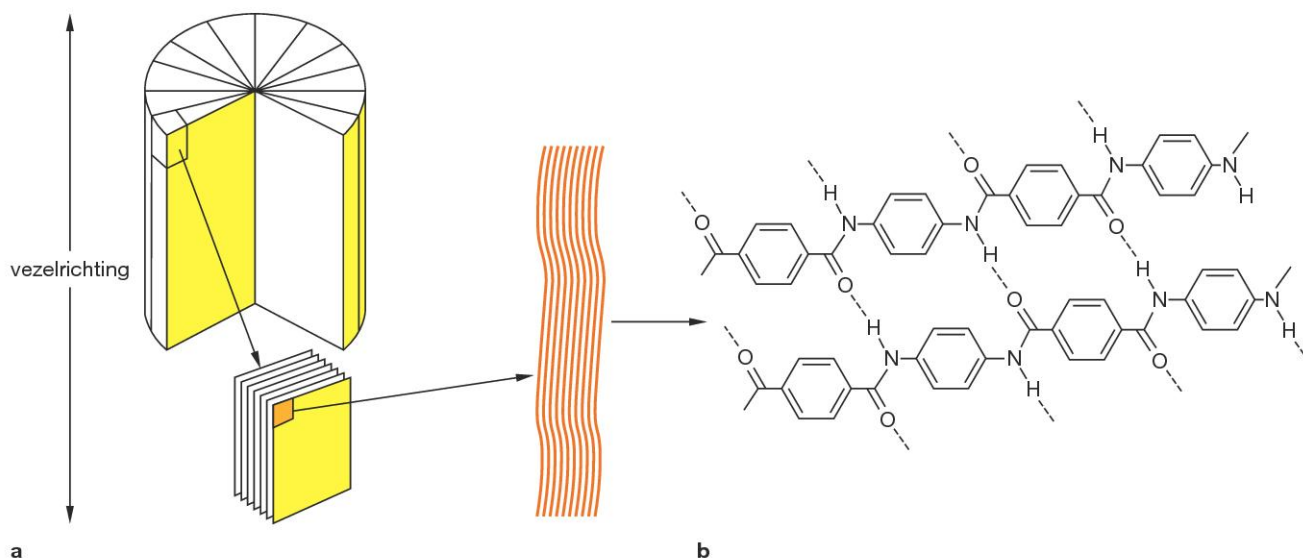
Kevlar wordt tegenwoordig ook verwerkt in motorkleding, maar is vooral bekend van kogelwerende vesten. Het is een kunststofvezel die vijfmaal sterker is dan staal. Dit heeft te maken met de bouw van de stof op micro- en mesoniveau. Het materiaal moet sterk zijn, maar ook niet heel zwaar en stug in het dragen. Dit zijn eigenschappen op **macroniveau**. Om te begrijpen hoe deze eigenschappen tot stand komen moet je kijken naar het verband tussen de eigenschappen en de structuur van het materiaal. Dat kun je zien als je inzoomt op de stof en een klein deel steeds verder uitvergroot.



13.8 Een uitvergroot deel van een kevlar matje. Je ziet dat de banen van het vlechtwerk weer uit dunnere vezels bestaan.

In figuur 13.8 zie je een gevlochten matje. Een kogelwerend vest bijvoorbeeld bestaat uit een aantal van die matjes achter elkaar. Voor een soepel vest moet je zorgen voor zo weinig mogelijk matjes. Dat kan door die matjes heel fijn te weven. Voor het vlechten van de matjes heb je een draad nodig met een grote treksterkte, want de snelheid van een kogel moet over een afstand van 1 cm worden teruggebracht van 750 m s^{-1} tot 0 m s^{-1} zonder dat de draad breekt, want anders schiet de kogel erdoorheen. De stijfheid van de draad die nodig is voor zo'n grote treksterkte kan alleen ontstaan als de vezels waaruit de draad bestaat in een strak geordende structuur liggen en niet in een rommelig verband. In figuur 13.9a zie je op **mesoniveau** hoe de vezels gestrekt liggen.

De bouwstenen van de vezels zijn polymeermoleculen die evenwijdig aan elkaar liggen. Dat is mogelijk met polymeerketens waarin op **microniveau** de karakteristieke groepen regelmatig in de molecuulstructuur zijn geordend, zie figuur 13.9b. Tussen de polymeerketens is niet alleen de vanderwaalsbinding aanwezig, maar er is ook een groot aantal waterstofbruggen, die de dwarsverbindingen tussen de polymeerketens vormen.



13.9a Uitvergroting van de vezels in de draad

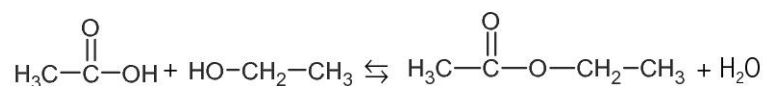
b De structuur van de polymeerketen

De dwarsverbindingen zorgen ervoor dat de ketens niet langs elkaar bewegen bij een kogelinslag en de sterke covalente bindingen in de lengterichting zorgen ervoor dat de draad niet breekt.

Condensatiereacties

De stof kevlar is een condensatiepolymeer. Om de **condensatiepolymerisatie** te kunnen begrijpen moet je eerst weten wat wordt verstaan onder een **condensatiereactie**.

Een voorbeeld van een condensatiereactie is de estervorming uit een zuur en een alcohol. Je hebt in hoofdstuk 6 geleerd dat ethaanzuur met ethanol kan reageren om de ester ethylethanoaat te vormen. Hierbij wordt zwavelzuur als katalysator gebruikt. Naast de ester wordt water gevormd.

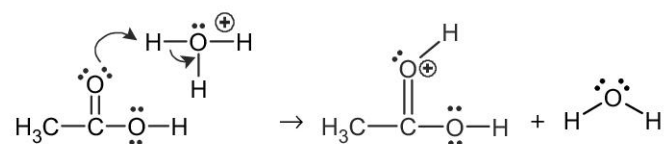


Om het verloop van een condensatiereactie te begrijpen heb je het reactiemechanisme nodig. Zoals je in hoofdstuk 12 hebt gezien geef je in een reactiemechanisme de moleculen weer in lewisstructuren en de verplaatsing van de elektronen met pijlen. Het reactiemechanisme van de estervorming verloopt in vier stappen.

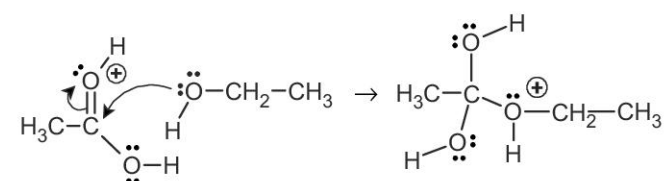


13.10 Tweevoudig olympisch kampioen windsurfen Dorian van Rijsselberghe; zijn zeil is van polyester.

Stap 1: Ethaanzuur neemt een proton op van H_3O^+ , afkomstig van het zwavelzuur.



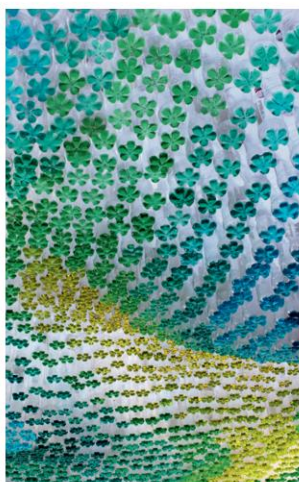
Stap 2: Er treedt een reactie op van het ion met ethanol.



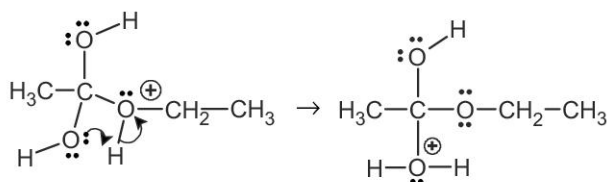
Stap 3: Een proton (H^+) verplaatst van het ene naar het andere O-atoom.



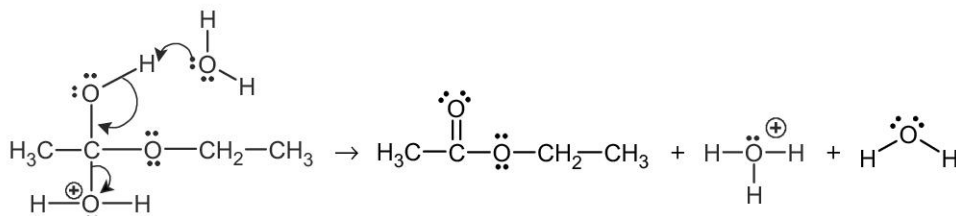
13.11a Deze carport is gemaakt van petflessen.



13.11b De onderkant van de carport uitvergroot



Stap 4: Er splitst water af en een watermolecuul neemt een proton op.



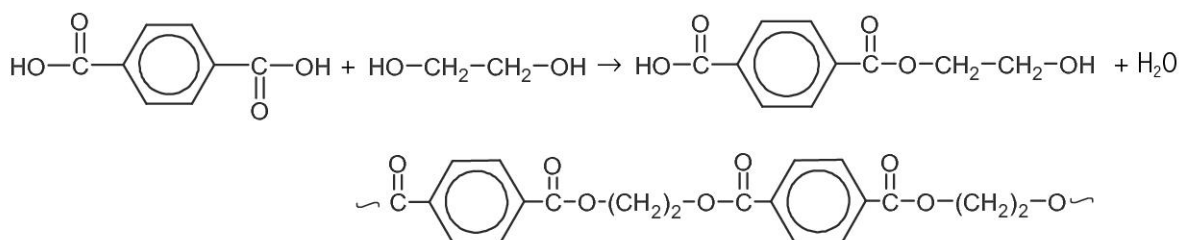
Je noemt een reactie waarbij uit twee moleculen een groter molecuul wordt gevormd en een klein molecuul wordt afgesplitst een **condensatiereactie**. De vorming van polymeren via condensatiereacties is naast additiepolymerisatie de tweede belangrijke manier om polymeren te maken. De bekendste soorten condensatiepolymeren zijn polyesters (zie figuur 13.10) en polyamiden.

De vorming van een ester is een evenwichtsreactie. De ester kan dus weer reageren met water om het zuur en de alcohol te vormen. Reacties waarbij moleculen door een reactie met water ontleden zijn **hydrolysereacties**.

Polyester

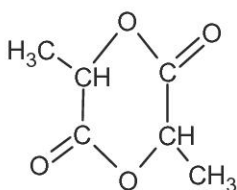
Polymeren die worden gemaakt door een condensatiereactie noem je **condensatiepolymeren**. Net als bij additiepolymerisatie wordt een groot aantal moleculen aan elkaar gekoppeld. Dit kan bijvoorbeeld door één stof te nemen waarvan de moleculen zowel een zuurgroep als een alcoholgroep bevatten. Het kan ook door twee stoffen met elkaar te laten reageren, een dizuur (een stof waarvan de moleculen twee zuurgroepen bevatten) en een diol (een stof waarvan de moleculen twee alcoholgroepen bevatten). Zo wordt de stof polyethyleentereftalaat gemaakt door benzeen-1,4-dicarbonzuur te laten reageren met ethaan-1,2-diol.

De zuurgroep die nog niet heeft gereageerd kan vervolgens met een ander ethaan-1,2-diol-molecuul reageren. De alcoholgroep kan met een ander benzeen-1,4-dicarbonzuurmolecuul reageren. Uiteindelijk ontstaat dan de stof pet die je waarschijnlijk wel kent van de petflessen, zie figuur 13.11 en 13.12.





13.12 Ook dit kunstwerk is gemaakt van peflessen.

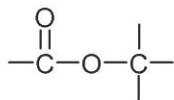


13.13 De structuur van lactide. In de praktijk wordt polymelkzuur (PLA) uit lactide gemaakt en niet uit melkzuur.



13.14 In Nanjing in China kun je een lichaamsscan laten maken en daarna jezelf 3D laten printen in de gewenste grootte. Polymelkzuur is zeer geschikt als 3D-printmateriaal.

Omdat de monomeereenheden via esterbindingen aan elkaar zitten, noem je dit polymeer een **polyester**. Kenmerkend in een polyester is dus de onderstaande groep.

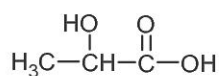


Een polymeer dat is ontstaan uit verschillende monomeren, zoals pet, noem je een **copolymeër**. Voor de productie van het hecht draad van polymelkzuur is maar één monomeer nodig. Melkzuur (2-hydroxypropaanzuur) is een hydroxyzuur en bevat een zuurgroep en een alcoholgroep. Polymelkzuur is een bioafbreekbaar polymeer, omdat het in je lichaam door een hydrolyse reactie weer wordt omgezet in melkzuur.

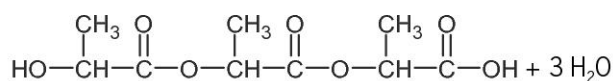
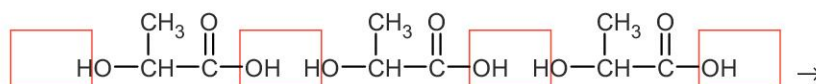
Voorbeeld

Geef aan hoe drie melkzuurmoleculen koppelen bij het vormen van polymelkzuur (figuur 13.14).

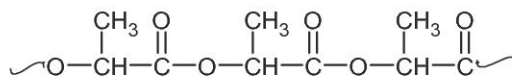
Melkzuur heeft als structuurformule:



Omdat de zuurgroep en de alcoholgroep deelnemen aan de reactie is het handig om deze aan de buitenkant te tekenen. We tekenen hier drie melkzuurmoleculen die met elkaar reageren, in werkelijkheid reageren er natuurlijk veel meer moleculen:

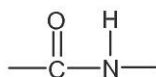


De structuur van het polymelkzuur geven we uiteindelijk weer als:



Polyamide

Een ander type condensatiepolymeren zijn **polyamiden**. Een **amide** is een verbinding waarin de volgende kenmerkende groep aanwezig is:

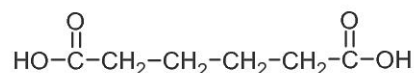


In een polyamide zijn monomeereenheden gekoppeld door een **amidebinding**. Een amide ontstaat uit de reactie van een zuur met een amine. Net als bij de polyester kan een polyamide ontstaan uit de reactie van een dizuur met een diamine, of uit aminozuren (deze bevatten een zuurgroep en een aminogroep).

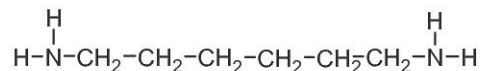


13.15 In deze situatie is een goed klimtouw van levensbelang.

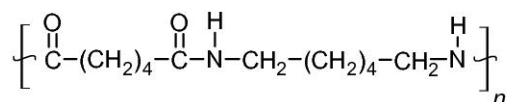
Een van de bekendste polyamiden is nylon-6,6. Deze stof wordt onder andere gebruikt voor airbags, voor autobanden en klimtouw (figuur 13.15). Nylon-6,6 ontstaat uit een polymerisatiereactie van hexaandizuur:



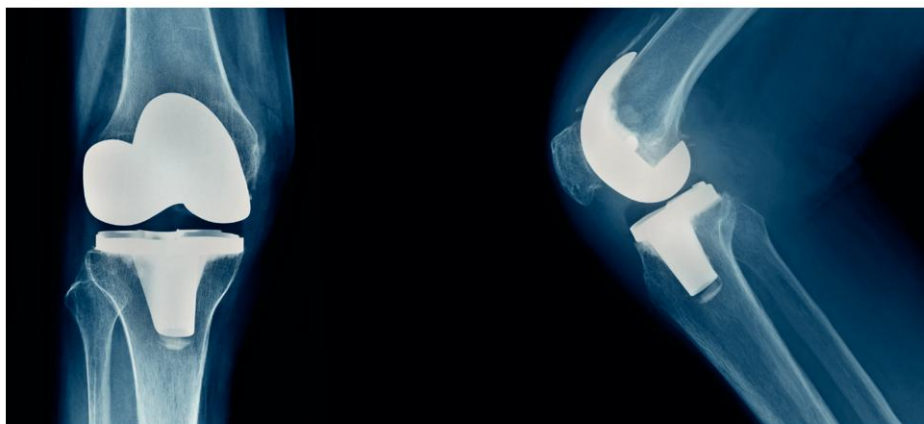
en hexaan-1,6-diamine:



Naast water ontstaat dan het polyamide.



● Experiment 13.4



13.16 Een kniegewricht. De kunststofdelen van een kunstgewricht zijn vaak ook van nylon gemaakt, soms versterkt met glasvezel. De metalen delen worden gemaakt van vitallium, een legering die niet wordt aangetast door lichaamssappen.

Samenvatting

- Een condensatiereactie is een reactie waarbij uit twee moleculen een groter molecuul wordt gevormd en een klein molecuul wordt afgesplitst. Estervorming is een voorbeeld van een condensatiereactie.
- Een hydrolysereactie is een reactie waarbij een molecuul door een reactie met water in twee kleinere moleculen splitst.
- Polyesters zijn condensatiepolymeren waarvan de monomeren zijn gekoppeld via condensatiereacties. De monomeren kunnen een dizuur en een diol zijn, of een hydroxyzuur. Naast de polymeren ontstaat water.
- Copolymeren zijn polymeren die ontstaan uit verschillende monomeren.
- Polyamiden zijn condensatiepolymeren waarin een amidebinding aanwezig is. De monomeren kunnen een dizuur en een diamine zijn of een aminozuur.

Glycix, biologisch en biologisch afbreekbaar

Onderzoekers van de Universiteit van Amsterdam hebben een nieuwe stap gezet in de ontwikkeling van glycix, de enige harde kunststof die zowel biologisch is als biologisch afbreekbaar is. Alle harde kunststof voorwerpen binnenshuis kunnen uit deze kunststof worden gemaakt, zoals bijvoorbeeld behuizingen van computers en telefoons, isolatieschuim en meubels. Dit is een grote stap voorwaarts in het bestrijden van de groeiende berg afval en de plastic soep in de oceanen. Maar kijk uit in de buitenlucht: glycix 'lost' na verloop van tijd op in water.

Onderzoekers Gadi Rothenberg en Albert Alberts ontdekten glycix bij toeval, ze waren op zoek naar een bio-brandstof en ontwikkelden een bioplastic (figuur 13.18). Nu hebben ze een nieuwe stap gezet in de ontwikkeling van glycix. De onderzoekers hebben bekendgemaakt dat de basisingrediënten van hun kunststof glycerol en citroenzuur zijn, twee ruim voorradige stoffen die uit groene grondstoffen kunnen worden gewonnen. Het gaat dus om een polyester. In verband met patentaanvragen zijn er nog geen verdere details bekendgemaakt, maar vanuit de industrie is er al veel belangstelling voor glycix.

Als persmoment werd onlangs een tafel van glycix aangeboden aan het bestuur van de Universiteit van Amsterdam (figuur 13.17).



13.17 Deze tafel van glycix is aangeboden aan het bestuur van de Universiteit van Amsterdam.

Dat glycix biologisch afbreekbaar is, is bijzonder omdat het veel dwarsverbindingen heeft waardoor een netwerk wordt gevormd. Gewoonlijk worden dit soort netwerken niet gemakkelijk afgebroken in de natuur, maar glycix dus wel.

De snelheid van afbraak is afhankelijk van de mate waarin de kunststof is uitgehard. Afhankelijk van de productiemethode varieert de afbraaktijd van enkele weken tot een jaar.

Glycix kan prima worden gebruikt in combinatie met andere materialen, het hecht zich namelijk goed aan bijvoorbeeld roestvrij staal en glas. Meubels die zijn gemaakt van glycix hebben wel extra bescherming nodig; de tafel die voor de UvA is gemaakt is bijvoorbeeld bedekt met een glasplaat, om te voorkomen dat een kopje koffie dat omvalt de tafel aantast.

Er volgt nog een lang traject van ontwikkeling van productiemethoden en van design van nieuwe artikelen, maar de stof is er.

Bron: Bio Based Press



13.18 Een stukje glycix

● Opdracht B15

Opdrachten

A 9 

- a Wat is kenmerkend aan een condensatiereactie?
- b Welke stof gebruik je bij de hydrolyse van een ester?

A 10 

Wat wordt verstaan onder een copolymeer?

A 11

- a Teken de groep die kenmerkend is voor polyesters.
- b Teken de groep die kenmerkend is voor polyamiden.

B 12

In deze opdracht kijk je nog een keer goed naar het mechanisme van de condensatiereactie waarbij ethylethanoaat wordt gevormd. Deze staat uitgebreid in de tekst beschreven.

- a Leg uit of ethaanzuur bij stap 1 een elektrofiel of een nucleofiel deeltje is.
- b Leg uit of ethanol bij stap 2 een elektrofiel of een nucleofiel deeltje is.

Het zuur wordt in deze reactie gebruikt als katalysator.

Een katalysator versnelt een reactie, zonder zelf te worden verbruikt. Het lijkt er in stap 1 op dat het zuur wel wordt verbruikt. Als je naar de totale reactie kijkt, is dit niet het geval.

- c Leg uit waaruit blijkt dat zwavelzuur hier een katalysator is.

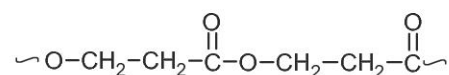
B 13 

Teken de structuurformule van een gedeelte van het polymermolecuul dat ontstaat bij de polymerisatie van onderstaande stoffen. Teken minstens twee formules van elk soort monomeer.

- a butaan-1,4-diol en benzeen-1,4-dicarbonzuur
- b 3-hydroxybutaanzuur
- c butaan-1,4-diamine en hexaandizuur
- d 2-amino-ethaanzuur

B 14

Hieronder staat de structuurformule van een polymeer.



- a Leg uit of dit een polyester is of een polyamide.
- b Welk monomeer kun je gebruiken om dit polymeer te maken? Teken de structuurformule.
- c Leg uit of hier sprake is van een copolymeer.

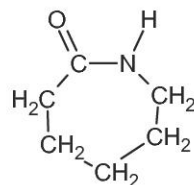
B 15

Lees de tekst in het kader 'Glycix, biologisch en biologisch afbreekbaar' en beantwoord de volgende vragen.

- a Teken de structuurformule van beide monomeren die in glycix worden gebruikt. Maak gebruik van Binas tabel 66A.
- b Teken de tri-ester die ontstaat als één citroenzuur-molecuul reageert met drie glycerolmoleculen.
- c Leg uit hoe er een polymeer kan ontstaan als je aan het product van b meer citroenzuurmoleculen en glycerol-moleculen toevoegt.
- d Wat is beter voor het milieu? Het afbreken van een kunststof of het hergebruiken ervan?

C 16 ★

Nylon-6 ontstaat uit een monomeer, caprolactam:



De polymerisatie wordt uitgevoerd met een kleine hoeveelheid water, toegevoegd aan caprolactam.

Dit water zorgt ervoor dat de amidebinding breekt.

- a Geef de vergelijking in structuurformules voor de reactie van water met caprolactam.

Het reactieproduct bij a reageert met caprolactam, waarbij de ring wordt verbroken.

- b Geef de vergelijking voor deze reactie in structuurformules.
- c Leg uit of de polymerisatie van caprolactam een condensatiepolymerisatie is.

C 17

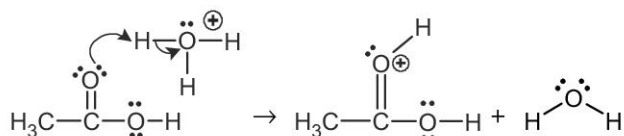
Isoamylacetaat is de ester van 3-methylbutaan-1-ol en ethaanzuur. Door de typerende geur en smaak van bananen wordt de stof ook wel bananenolie genoemd. Isoamylacetaat zit onder andere in snoepjes.

Om 3-methylbutaan-1-ol en ethaanzuur met elkaar te laten reageren is een zuur als katalysator nodig.

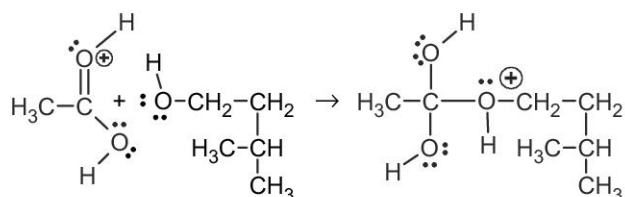
- a Geef de vergelijking van de reactie van 3-methylbutaan-1-ol en ethaanzuur. Gebruik structuurformules voor de koolstofverbindingen.

Hierna staat het mechanisme van deze reactie onvolledig weergegeven.

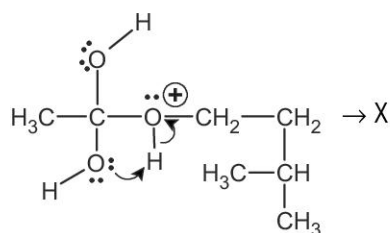
Stap 1:



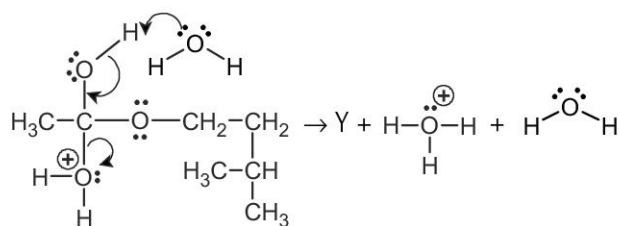
Stap 2:



Stap 3:



Stap 4:



Bij stap 2 ontbreken de pijlen die het verplaatsen van de elektronen weergeven.

- b** Neem de lewisstructuren over en teken de pijlen.
c Teken de lewisstructuur van de verbinding X bij stap 3.
d Teken de lewisstructuur van de verbinding Y bij stap 4.

C 18 ★

De stof nylon-6,10 kan worden gemaakt uit de stoffen hexaan-1,6-diamine en decaandizuurchloride. Carbonzuurchloriden zijn zeer reactieve stoffen. Dit komt door de aanwezigheid van de groep:



- a** Geef de structuurformule van een gedeelte van een molecuul nylon-6,10. Teken twee monomeereenheden.
b Welk molecuul ontstaat naast de moleculen nylon-6,10?
c Wat betekenen de getallen 6 en 10?

C 19

De stof kevlar wordt gebruikt voor kogelvrije vesten. Hieronder staat een gedeelte uit het midden van het polymeer kevlar weergegeven:



- a** Teken de structuurformule van de twee monomeren waaruit kevlar is opgebouwd.
b Leg uit waardoor kevlar zo sterk is. Geef in je uitleg duidelijk aan welke eigenschappen je vanuit het microniveau verklaart en welke vanuit het mesoniveau.

Experiment

13.4 Nylon

In dit experiment maak je een zo lang mogelijke nylandraad.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat een condensatiereactie is en het reactiemechanisme in lewisstructuren weergeven;
- uitleggen wat condensatiepolymerisatie is en de vorming van een polyester en een polyamide in structuurformules weergeven;
- uitleggen wat een copolymeer is;
- vanuit een of meerdere monomeren de structuurformule van een polymeer geven;
- bij een polymeer de structuurformule van het monomeer of de monomeren geven.

Brug van kunststof

Bij het recyclen van kunststoffen komt veel CO₂ vrij. Toch kan een brug van kunststof beter voor het milieu zijn dan eentje van beton of staal. Dit komt doordat een kunststof brug veel minder onderhoud nodig heeft en behoorlijk efficiënt gebouwd kan worden. Deze voetgangersbrug in Nijmegen is gemaakt van een versterkte kunststof en veert een beetje mee met je voetstappen.

**Je leert**

- kunststoffen indelen in thermoplasten en thermoharders;
- wat bepalend is voor de flexibiliteit van kunststoffen.

13.3 Eigenschappen

Verschillende eigenschappen

Een brug moet voldoen aan een aantal eigenschappen. Hij moet bijvoorbeeld sterk zijn, lang meegaan en bestand zijn tegen water. Niet iedere kunststof heeft deze eigenschappen. Zelfs binnen een groep kunststoffen kunnen de eigenschappen heel verschillend zijn. In figuur 13.19 zie je een zeiljacht. De boot is gemaakt van polyester en is hard en niet flexibel. Het zeil is gemaakt van dacron, verrassend genoeg ook een polyester. De eigenschappen van het zeil zijn natuurlijk totaal anders dan die van de boot. Het zeil is flexibel en kan opbollen in de wind. Deze kunststoffen, die allebei polyesters zijn, hebben dus totaal verschillende eigenschappen. Dit kun je verklaren vanuit de structuren op micro- en mesoniveau.



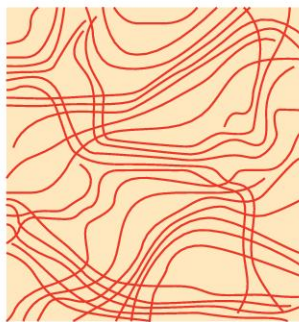
13.19 Veel onderdelen van een zeilboot kunnen van kunststoffen zijn gemaakt.

Thermoplast en thermoharder

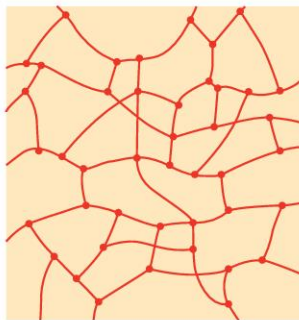
Als er kortsluiting ontstaat, kan een stopcontact heel warm worden. De kunststof waarvan het stopcontact is gemaakt wordt echter niet zacht. Er zijn ook kunststoffen die bij verwarmen wel zacht worden. Zo kun je een petfles omsmelten om er iets anders van te maken. Een boterhamzakje is bij kamertemperatuur al goed te vervormen.

Kunststoffen die zacht worden bij verwarmen noem je **thermoplasten**. Deze vervormbare kunststoffen worden ook wel plastics genoemd. Kunststoffen die hard blijven bij verwarmen noem je **thermoharders**, je kunt ze niet vervormen. Het verschil in eigenschappen op macroniveau tussen thermoplasten en thermoharders kun je op microniveau verklaren aan de hand van de bouw van de moleculen.

De moleculen waar thermoplasten uit bestaan zijn lange losse polymeerketens. Deze ketens worden bij elkaar gehouden door vanderwaalsbindingen en de bewegingsvrijheid is niet groot. Door verhoging van de temperatuur gaan de moleculen harder bewegen. Een deel van de vanderwaalsbindingen wordt daardoor verbroken en de kunststof wordt zacht.



a

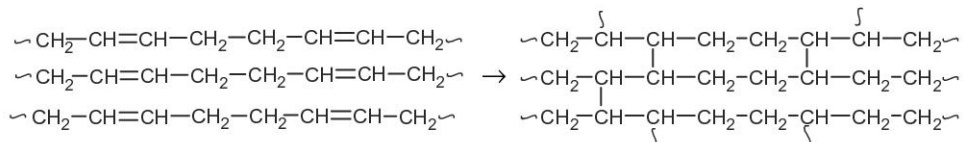


b

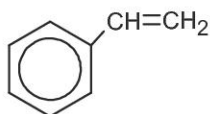
13.20 Thermoplasten (a) bestaan uit losse polymeerketens, thermoharders (b) uit een netwerk van polymeerketens.

Bij thermoharders zijn de ketens aan elkaar gekoppeld door **crosslinks**, dwarsverbindingen. Dit zijn atoombindingen. Door de crosslinks ontstaat een **netwerkpolymeer**, zie de schematische weergave in figuur 13.20a en b.

Netwerkpolymeren zijn niet flexibel omdat je atoombindingen moet verbreken om ze te vervormen. Crosslinks kunnen bijvoorbeeld ontstaan als er nog dubbele bindingen in de losse ketens aanwezig zijn. Op deze plaatsen kan er een reactie optreden, waarbij de ene keten aan de andere keten wordt gekoppeld. Dit kun je als volgt vereenvoudigd weergeven:

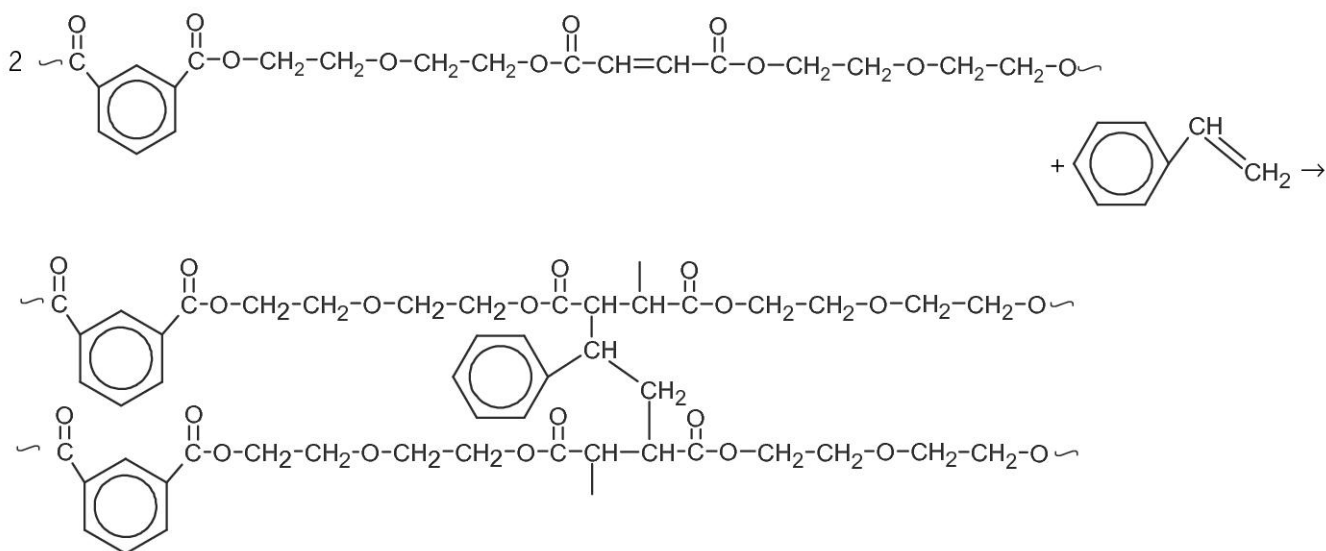


Tot de polyesters behoren zowel thermoplasten als thermoharders. Een thermoharder wordt vaak gemaakt uit bijvoorbeeld styreen en een onverzadigde polyester, een ketenpolymeer waarin nog dubbele bindingen voorkomen. De structuurformule van styreen is:

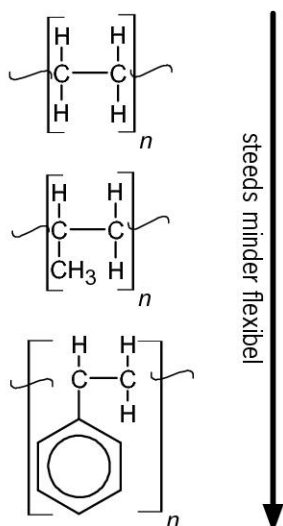


Via een additiereactie koppelt de dubbele band van styreen aan de dubbele bindingen van twee verschillende polymeermoleculen, zie figuur 13.21. Er ontstaan dan crosslinks die de ketenpolymeer omzetten in een netwerkpolymeer, een thermoharder.

Crosslinks kunnen ook ontstaan als er aan de polymeermoleculen zijgroepen vastzitten die met zijgroepen van een andere polymeermolecuul kunnen reageren. Als een polymeermolecuul bijvoorbeeld een zuurgroep als zijgroep heeft en een ander polymeermolecuul heeft een alcoholgroep als zijgroep, dan kunnen deze met elkaar reageren om een estergroep te vormen.



13.21 Styreen koppelt meerdere polyesterketens aan elkaar.



13.22 Grotere zijketens maken een kunststof minder flexibel.

Hierbij koppelen de twee molecuulketens aan elkaar. De polyester van de boot van figuur 13.19 is een thermoharder die ook nog eens verstevigd is door glasvezel. Het zeil is gemaakt van een thermoplast. Daarom is het zeil wel flexibel en de boot niet. Hoe je thermoplasten nog flexibeler kunt maken bespreken we in het vervolg van deze paragraaf.

Bij sterke verhitting ontleden thermoharders, waarbij ze zwart worden door het ontstaan van koolstof. Thermoplasten worden eerst zacht bij verwarmen, maar bij sterke verhitting zullen ook thermoplasten gaan ontleden en zwart worden.

De flexibiliteit van een kunststof

De flexibiliteit van een thermoplast is op een aantal manieren te beïnvloeden. Factoren die invloed hebben zijn bijvoorbeeld de aanwezigheid van zijketens, de polymerisatiegraad en het toevoegen van weekmakers.

Zijketens

Polymeren worden minder flexibel als aan de molecuulketen grotere zijgroepen zitten. Door deze grote groepen kunnen de ketens namelijk minder gemakkelijk langs elkaar bewegen. Zo is polystyreen minder flexibel dan polypropreen, omdat de fenylgroep groter is dan de methylgroep. Polyetheen is het meest flexibel, zie figuur 13.22.

Polymerisatiegraad

Maar de flexibiliteit van verschillende soorten polyetheen is ook anders. Dit komt door de **polymerisatiegraad**, de lengte van de polymeermoleculen. Met de lengte bedoelen we het aantal monomeereenheden. Hoe meer monomeereenheden er in een polymeermolecuul aanwezig zijn, hoe hoger de polymerisatiegraad en hoe minder flexibel de kunststof wordt. Het is dus van belang de polymerisatiegraad bij de productie van een polymeer onder controle te houden, omdat deze van grote invloed is op de materiaaleigenschappen. Polyetheen wordt gemaakt door additiepolymerisatie. Omdat de terminatiestap niet steeds bij gelijke lengte van de molecuulketens verloopt, ontstaan er ketens met verschillende lengtes. Je hebt dus eigenlijk een mengsel van polyetheenketens. Je spreekt dan van een **gemiddelde ketenlengte**. Je kunt dus ook niet spreken over de molecuulmassa, maar alleen van een **gemiddelde molecuulmassa**.

De polymerisatiegraad is afhankelijk van de snelheden waarmee de propagatie- en terminatiereacties verlopen. Als de propagatie veel sneller verloopt dan de terminatie, is de polymerisatiegraad hoog en worden de ketens lang. Het duurt dan immers wat langer voordat de reactie stopt.

De reactiesnelheid van de propagatie neemt toe als de concentraties van de radicalen in het reactiemengsel afnemen. Dit is te verklaren met het botsende-deeltjesmodel. Terminatiereacties treden op door botsing van twee radicalen, bij propagatiereacties reageert een radicaal met een monomeer. Als er meer radicalen aanwezig zijn, zal er sneller terminatie optreden. De ketens worden dan minder lang.

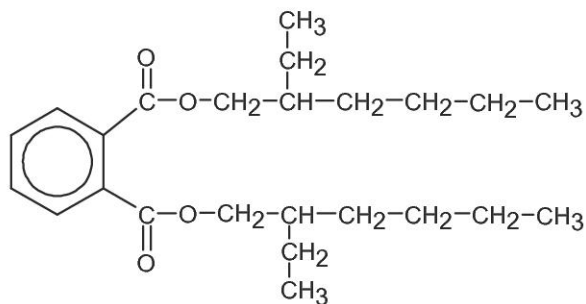
Weekmakers

Kunststoffen worden ook flexibeler door het toevoegen van **weekmakers**. Een weekmaker is een stof met een lage molecuulmassa die wordt toegevoegd aan een polymeer. Een bekende weekmaker voor pvc is de ester bis(2-ethylhexyl)ftalaat, zie de structuur op de volgende bladzijde. Ftalaten zijn niet onomstreden als weekmakers. Ze schijnen gezondheidsrisico's met zich mee te brengen.

Er zijn ook bio-based weekmakers zoals tri-ethylcitraat die zeer geschikt is als weekmaker voor pvc's.



13.23 Een zwemband van pvc voor kinderen mag geen ftalaten als weekmaker bevatten, maar wel tri-ethylcitraat.



- Experiment 13.5
- Experiment 13.6

De moleculen van een weekmaker gaan tussen de polymeermoleculen zitten, waardoor de vanderwaalskracht die de ketens op elkaar uitoefenen minder wordt. Hierdoor krijgen de ketens meer bewegingsmogelijkheden en neemt de flexibiliteit toe.



a



b

13.24 Biologisch afbreekbaar frietbakje (a) en een hamburgerverpakking (b), beide gemaakt van suikerrietpulp.

Afbreekbaar frietbakje

Als je een ijsje eet, dan eet je het hoorntje natuurlijk gewoon op. Friet eet je echter uit een wit plastic bakje dat je niet kunt eten. De natuur kan het ook niet afbreken, waardoor weggegooide bakjes tientallen jaren blijven liggen. Daarom zie je tegenwoordig steeds vaker bakjes van karton. Karton bestaat net als papier uit cellulosevezels die in de natuur wel afgebroken kunnen worden. Als je het bakje echter uit zetmeel zou maken, dan zouden wij het als mensen zelfs kunnen eten. Een andere optie voor dit soort bioplastics is het polymelkzuur uit paragraaf 13.2. Op microniveau zijn afbreekbare plastics vaak condensatiepolymeren: natuurlijke polymeren, zoals eiwitten of koolhydraten. Niet-afbreekbare polymeren zijn vaak additiepolymeren zoals polyetheen of polypropreen.

Gevoeligheid voor uv-straling

Een nadeel van veel polymeren is de gevoeligheid voor uv-straling waardoor polymeren die aan zonlicht worden blootgesteld na verloop van tijd in sterkte achteruitgaan. Elektronen in de atoombindingen tussen de C-atomen van polymeren absorberen de **uv-straling** van de zon en krijgen hierdoor soms zo veel energie dat ze niet langer een bindend elektronenpaar vormen. De atoombinding wordt dan verbroken en de ketens van het polymeer worden korter, waardoor de sterkte van het polymeer vermindert.

Vooral polymeren met C=C-bindingen zijn gevoelig voor uv-straling, omdat elektronen in een dubbele binding gemakkelijker uv-straling absorberen. Zelfs als de dubbele binding niet in de koolstofketen zelf zit, maar in een zijgroep, kan de vorming van radicalen toch voor afbraak van de polymeerketen zorgen.



13.25 Kunststofvelden zijn duur in de aanleg en mogen niet te hard slijten. Ze zijn daarom ook voorzien van uv-stabilisatoren.

Daarom worden polymeren vaak gemengd met een **uv-stabilisator**, die de uv-straling absorbeert voordat ze de polymeerketens bereikt of die de radicalen onschadelijk maakt die ontstaan onder invloed van uv-straling (zie figuur 13.25). Thermoharders zijn meestal beter bestand tegen uv-straling. Door de crosslinks hebben deze polymeren een netwerkstructuur. Afbraak van een beperkt aantal atoombindingen leidt bij thermoharders niet tot het verkorten van ketens en het uiteenvallen van het polymeer.

Thermoharders hergebruiken

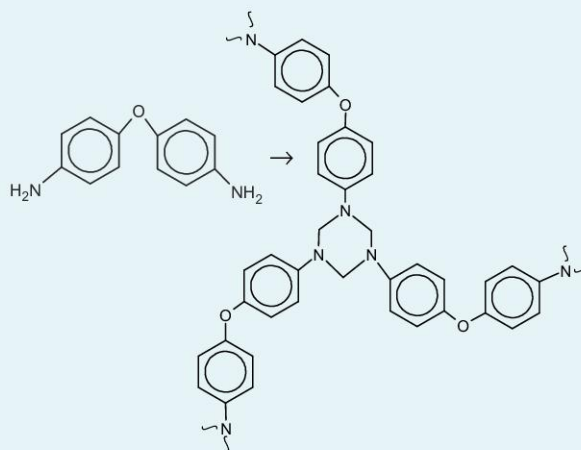
In principe kun je een thermoharder niet hergebruiken omdat je door verwarmen de vorm niet kunt veranderen. De stof blijft hard en verkoolt bij een bepaalde temperatuur. Meestal worden deze kunststoffen daardoor niet hergebruikt, maar fijngemalen en als vulstof gebruikt. Zo hebben ze nog enig nut.

Thermoplasten kun je juist wel zacht maken door ze te verwarmen. Hierdoor kun je thermoplastische kunststoffen een tweede leven geven. Daardoor is het gebruik van thermoplasten over het algemeen duurzamer dan dat van thermoharders. Maar daar hebben onderzoekers van IBM Research nu iets op gevonden. Ze hebben een thermoharder gemaakt die wel kan worden hergebruikt. Het is ze gelukt om de bindingen van de thermoharder te verbreken, zodat er weer bruikbare monomeren ontstaan. Deze kunnen vervolgens weer worden gebruikt om iets met een andere vorm te maken.

Een van de monomeren die wordt gebruikt is een diamine. De diamines kunnen een polycondensatiereactie aangaan met paraformaldehyde waarbij drie diamines combineren tot een driepuntige ster, zie figuur 13.26. De stof die ontstaat is een thermoharder en is erg hard en goed bestand tegen licht zuur en licht basisch milieu.

Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld het glycix uit de vorige paragraaf. Als de pH onder de 2 daalt, gaat het polymeer hydrolyseren. Je krijgt dan de monomeren weer terug.

In de huidige vorm is de kunststof nog niet heel bruikbaar omdat deze erg bros is. Maar de verwachting is dat hier wel wat aan kan worden gedaan door wat te veranderen aan de monomeren die worden gebruikt. Voor het milieu is het goed als we ook thermoharders kunnen gaan hergebruiken.



13.26 De vorming van het polymeer

● Opdracht B25

Samenvatting

- Thermoplasten bestaan uit losse polymeerketens. Thermoplasten worden zacht bij verwarmen. Thermoharders zijn netwerkpolymeren, de polymeerketens zijn verbonden door crosslinks. Thermoharders blijven hard bij verwarmen.
- Een thermoharder is vaak niet flexibel.
- De flexibiliteit van een thermoplast is afhankelijk van de grootte van de zijketens van het polymeermolecuul, de polymerisatiegraad en de aanwezigheid van weekmakers.
- Polymeren hebben een gemiddelde ketenlengte en een gemiddelde molecuulmassa.
- Polymeren worden vaak gemengd met een uv-stabilisator die de uv-straling absorbeert voordat ze de polymeerketens bereikt of die de radicalen onschadelijk maakt die ontstaan onder invloed van uv-straling.

Opdrachten

A 20 

- a** Wat is het verschil in eigenschappen van een thermoplast en een thermoharder?
b Verklaar het verschil met de structuur op microniveau.

B 21 

- a** Welke factoren zijn van invloed op de flexibiliteit van een thermoplast?
b Waarom hebben deze factoren geen invloed op de flexibiliteit van een thermoharder?

B 22

Soms wordt polyetheen gechloreerd met chloorgas onder invloed van licht.

- a** Leg uit of op deze manier polyvinylchloride wordt gevormd.
b Leg uit of gechloreerd polyetheen flexibeler of minder flexibel is dan polyetheen.

C 23 DOP

Een belangrijke weekmaker is de di-ester van benzeen-1,2-dicarbonzuur (ftaalzuur) en 2-ethylhexaan-1-ol.

Deze di-ester wordt in de handel helaas onjuist DOP genoemd, van het Engelse 'dioctylphthalate'.

- a** Geef de reactievergelijking voor de vorming van DOP.

Weekmakers migreren langzaam uit het polymeer naar de lucht of naar andere naburige stoffen. In kunststof verpakkingsmateriaal voor voedingsmiddelen komen meestal ook weekmakers voor.

Volgens de normen van de warenwet mag in een kilogram voedingsmiddel maximaal 40 mg DOP migreren. In verhouding tot de polymeren is de molecuulmassa van de weekmakers erg klein. Toch is DOP een behoorlijk groot molecuul.

Esters met een veel kleinere molecuulmassa dan DOP zijn ook uitstekende weekmakers voor kunststof. Toch past men altijd weekmakers toe met een behoorlijk grote molecuulmassa.

- b** Leg uit waarom men dit doet.

De kunststofverpakking van 1,0 L zonnebloemolie heeft een massa van 50 g en bevat 28 massaprocent DOP. De dichtheid van de zonnebloemolie is $0,92 \text{ kg dm}^{-3}$.

- c** Bereken hoeveel massaprocent DOP uit de kunststofverpakking mag migreren, zodat nog net aan de eisen van de warenwet wordt voldaan.

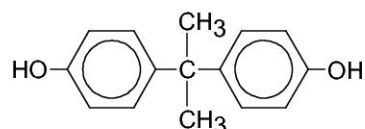
De migratie van DOP naar zonnebloemolie is veel groter dan de migratie van DOP naar tafelazijn.

- d** Geef daarvoor een verklaring.

B 24 

Polycarbonaten zijn polymere stoffen met superieure materiaaleigenschappen. Ze hebben een grote slagvastheid en zijn bovendien transparant. Ze worden gebruikt als veiligheidsglas in bankgebouwen, in integraalhelmen en ook in de cockpit van de Lockheed Martin F-22 Raptor (figuur 13.27). Gemengd met andere polymeren vinden ze toepassing in de auto-industrie (bumpers, daken en dergelijke). Ook motor- en bromfietshelmen bevatten vaak polycarbonaat.

Een van de polycarbonaten wordt gemaakt uit fosgeen (COCl_2) en een stof met de volgende structuurformule:



13.27 De kracht van polycarbonaat komt erg goed van pas bij de cockpit van de Lockheed Martin F-22 Raptor.

Tijdens het polymerisatieproces ontstaat ook HCl.

- a** Teken een deel van de structuur van een polycarbonaat-molecuul, dat bestaat uit twee monomeereenheden.

Het polycarbonaat bij a is een polyester.

- b** Leg dit uit.
c Is deze stof een thermoplast of een thermoharder?

B 25

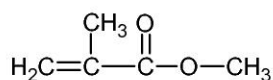
Lees de tekst in het kader 'Thermoharders hergebruiken' en beantwoord de volgende vragen.

Het polymeer wordt gevormd in een reactie van een diamine met paraformaldehyde. De diamine staat weergegeven in het tekstkader. Paraformaldehyde is de additiepolymeer van methanal en heeft als formule: $(\text{CH}_2\text{O})_n$.

- a** Teken de structuurformule van paraformaldehyde. Geef in het polymeer drie monomeereenheden weer.
b Welk molecuul komt, naast het polymeer, vrij bij de reactie van de diamine met paraformaldehyde?

C 26 Plexiglas

De methylester van methacrylzuur heet methyl-methacrylaat en heeft de volgende structuurformule:



- a** Geef de structuurformule en de systematische naam van methacrylzuur.

Door polymerisatie van methylmethacrylaat ontstaat een doorzichtige polymere stof, die als 'plexiglas' of 'perspex' grote bekendheid heeft gekregen, zie figuur 13.28.

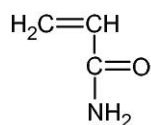
- b** Teken de structuur van een deel van een polymethylmethacrylaatmolecuul dat bestaat uit vier monomeereenheden.
c Is polymethylmethacrylaat een thermoplast of een thermoharder?

De gemiddelde molecuulmassa van polymethylmethacrylaat is $2,5 \cdot 10^6$ u.

- d** Bereken de gemiddelde polymerisatiegraad van het polymeer.

C 27 Acrylamide

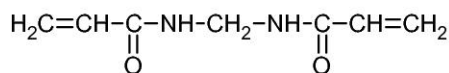
Acrylamide heeft de volgende structuurformule:



Door additiepolymerisatie ontstaat polyacrylamide, dat onder andere als superabsorberend materiaal wordt gebruikt. Er wordt beweerd dat polyacrylamide tot honderdmaal zijn eigen massa aan water kan opnemen.

- a** Bereken hoeveel watermoleculen per acrylamide eenheid zijn gebonden wanneer polyacrylamide honderdmaal zijn eigen massa aan water heeft opgenomen. Geef je antwoord in twee significante cijfers.
b Geef een gedeelte van vier acrylamide-eenheden uit het midden van een molecuul polyacrylamide in een structuurformule weer.

Polyacrylamide is een ketenpolymeer. Maar wanneer acrylamide polymeriseert in aanwezigheid van de stof N,N-methyleen-bisacrylamide ontstaat een netwerkpolymeer. De structuurformule van N,N-methyleen-bisacrylamide is als volgt:

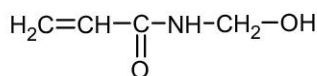


- c** Leg uit dat een netwerkpolymeer ontstaat wanneer polymerisatie optreedt in een mengsel van acrylamide en N,N-methyleen-bisacrylamide.



13.28 Dit is de '1939 Pontiac Plexiglass Ghost Car'.

Netwerkpolymeren van acrylamide en N,N-methyleen-bisacrylamide worden sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw veel in de bouw toegepast als voegmiddel in metselwerk. Al snel na de introductie van acrylamide ontdekten men dat deze stof schadelijk kan zijn voor het zenuwstelsel. Acrylamide is toen vervangen door het minder schadelijke N-methylolacrylamide:



N-methylolacrylamide kan worden verkregen door reactie van acrylamide met een stof X. Bij deze reactie is N-methylolacrylamide het enige reactieproduct.

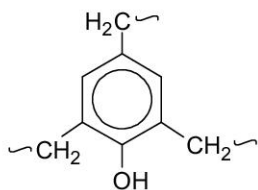
d Geef de structuurformule van de bedoelde stof X.

Naar: CE wvo 2011-I

C 28 Bakeliet ★

Een van de oudste thermoharders is bakeliet, zie figuur 13.29. In deze naam leeft de Belgische onderzoeker Leo Baekeland voort, die in 1907 een proces ontwikkelde voor de bereiding van deze kunststof.

Bakeliet ontstaat uit methanal (formaldehyde) en benzenol (fenol). De structuur van bakeliet kun je als volgt noteren:



De CH_2 -groepen vormen steeds dwarsverbindingen tussen fenolmoleculen.

- Teken een deel van de structuur van bakeliet met drie aromatische ringen.
- Welk bijproduct ontstaat tijdens het polymerisatieproces?
- Laat zien dat bij de vorming van bakeliet methanal en fenol reageren in de molverhouding 3 : 2.
- Waardoor is bakeliet een thermoharder?

Als de reactie van methanal met fenol wordt uitgevoerd met een overmaat fenol, ontstaat thermoplastisch materiaal, dat als 'novolak' toepassing vindt in de lak- en verfindustrie.

- Waardoor wordt bij een overmaat fenol een thermoplast gevormd?



13.29 De buitenkant van deze vintage radio is van bakeliet gemaakt.

Experimenten

13.5 Polyurethaanschuim

Je ziet de productie van polyurethaanschuim.

13.6 Kunststoffen herkennen

Waar herken je een kunststof aan?

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat een thermoplast en wat een thermoharder is;
- uitleggen wat crosslinks zijn en hoe deze worden gevormd;
- uitleggen welke factoren van invloed zijn op de flexibiliteit van thermoplasten.

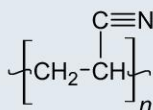
Afsluiting

Oefenopdrachten



13.30 Orlon is een bekend garen van DuPont voor bijvoorbeeld het breien van truien.

- 1** De synthetische vezels die onder de handelsnamen 'orlon' en 'dralon' (figuur 13.30) bekend staan, zijn voor een groot deel opgebouwd uit moleculen polyacrylonitril:



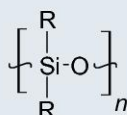
- a** Geef de structuurformule van het monomeer waaruit polyacrylonitril is gemaakt.

Nitrilrubber is een copolymeer van acrylonitril en buta-1,3-dieen. Deze rubbersoort is slijtvast en resistent tegen olie en benzine.

- b** Teken een structuurformule van een deel van dit copolymeer dat bestaat uit de twee monomeereenheden.

2 Siliconen

Siliconen zijn ongeladen siliciumpolymeren:



In de synthetische siliconen die het meest worden toegepast, is R een methylgroep. Siliconen zijn bestand tegen hoge en lage temperatuur, en tegen licht. Ze zijn chemisch inert en niet giftig. Ze worden toegepast in vloeibare vorm (siliconenolie), als hars en als rubber (siliconenrubber). Zie ook figuur 13.31.



13.31 Siliconen worden ook gebruikt voor contactlenzen.

De productie van siliconen kun je als volgt beschrijven:

- 1 Door een reactie van chloormethaan met elementair Si ontstaat dimethyldichloorsilaan: $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$.
- 2 Dimethyldichloorsilaan wordt gehydrolyseerd. Er ontstaat ook HCl.
- 3 Het reactieproduct bij (2) wordt gepolymeriseerd.

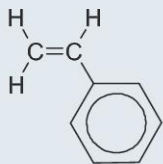
- a** Geef de vergelijking in structuurformules voor elk van de reacties (1), (2) en (3).
b Leg uit of de reactie bij (3) een additie- of condensatiepolymerisatie is.

Wanneer in het reactiemengsel bij (1) ook trimethylchloorsilaan aanwezig is, heeft dat gevolgen voor de polymerisatiegraad bij reactie (3).

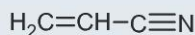
- c** Leg uit wat er met de polymerisatiegraad gebeurt.

Als in het reactiemengsel bij (1) methyltrichloorsilaan aanwezig is, heeft dat ook gevolgen voor het polymerisatieproces bij (3).

- d** Leg uit welke gevolgen dat zijn en geef ook aan wat het gevolg is voor de eigenschappen van de siliconen op macroniveau.



- 3** Hiernaast is de structuurformule van styreen afgebeeld. Styreen is onder andere de grondstof voor de bereiding van ABS (acrylonitril-butadien-styreen). Een andere grondstof voor de bereiding van ABS (figuur 13.32) is een polymeer van buta-1,3-dieen. Als buta-1,3-dieen polymeriseert, zijn de koolstofatomen 1 en 4 betrokken bij de polymerisatie. In een molecuul van dit polybutadien is hierdoor per monomeereenheid nog een C=C-binding in de hoofdketen aanwezig. Door de aanwezigheid van deze C=C-bindingen kan polybutadien met acrylonitril en styreen reageren. Er ontstaan dan zijtakken aan de polybutadienmoleculen waarin moleculen acrylonitril en styreen zijn verwerkt. Hieronder is de structuurformule van acrylonitril afgebeeld:



13.32 ABS wordt gebruikt voor het maken van legosteentjes.

- a** Geef van het hierboven beschreven polybutadien een gedeelte uit het midden van een polymeermolecuul in een structuurformule weer, dat bestaat uit twee monomeereenheden. Houd geen rekening met eventuele *cis-trans*-isomerie.
- b** Geef de structuurformule van een fragment van een molecuul ABS. Dit fragment moet bestaan uit een polybutadieeneenheid, een acrylonitrileenheid en een styreeneenheid.

In de industrie wordt styreen onder andere bereid uit ethylbenzeen. In een evenwichtsreactie ontstaan styreen en waterstof. De vorming van styreen is endotherm. De omstandigheden in de reactor zijn zodanig dat alle stoffen in de gasfase verkeren. Om de jaaropbrengst aan styreen zo hoog mogelijk te maken, wordt de reactie bij hoge temperatuur uitgevoerd.

- c** Geef de reactievergelijking voor de vorming van styreen uit ethylbenzeen. Gebruik structuurformules voor de organische stoffen.
- d** Geef twee redenen waarom het voor de jaaropbrengst voordelig is om de reactie bij een hoge temperatuur uit te voeren. Licht je antwoord toe.

Het voor de bereiding van styreen benodigde ethylbenzeen wordt in een apart proces geproduceerd. Daartoe laat men etheen reageren met benzeen. Er ontstaan echter naast ethylbenzeen ook di-ethylbenzenen en tri-ethylbenzenen. Van tri-ethylbenzeen kunnen verschillende isomeren ontstaan.

- e** Geef de structuurformules van alle tri-ethylbenzenen.

Naar: CE vwo 2011-II

- 4** De stof pvc (polyvinylchloride) wordt in verschillende stappen gemaakt. Eerst wordt bij 50 °C en een druk van 9 bar vinylchloride (chlooretheen) in een reactievat gebracht, samen met een suspendermiddel, een grote hoeveelheid water en een initiator. De initiator start het polymerisatieproces.

- a** Geef deze stap in een reactievergelijking in structuurformules weer. Gebruik voor de formule van de initiator $\text{In}\cdot$. Geef met pijlen het verplaatsen van de elektronen weer.

In een tweede reactor wordt het polymerisatieproces voortgezet, tot uiteindelijk korreltjes ontstaan met een diameter tussen de 0,1 en 1 mm. Dit proces heeft een opbrengst van ongeveer 90%. Het niet-omgezette vinylchloride wordt teruggewonnen.

- b** Geef de propagatiestap in een reactievergelijking in structuurformules weer.
- c** Geef de terminatiestap in een reactievergelijking in structuurformules weer.

- 5 In de *Volkskrant* stonden artikelen over het apart inzamelen van kunststoffen (figuur 13.33). Hierna volgt een fragment uit een van die artikelen.

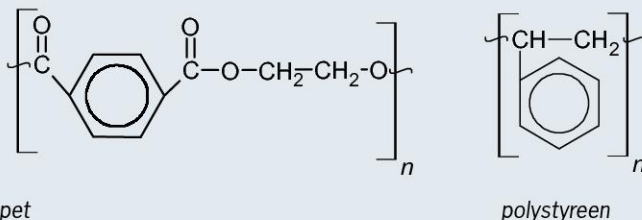
Kunststof apart inzamelen

Kunststofverpakkingen zijn een crime. In de verbrandingsoven van een afvalverwerkingsbedrijf leiden de energierijke verpakkingen tot extra onderhoud aan het metselwerk doordat de temperatuur te hoog oploopt. Ook milieutechnisch is het beter om de verpakkingen apart te houden. Na te zijn versnipperd tot vlokken of vermalen tot plastic korrels kunnen ze een tweede leven beginnen als nieuw flesje of flacon. Als de afvalfracties van onvoldoende zuiverheid zijn, kunnen ze tenminste nog als fleecetrui of als bermpaaltje verder.

Het metselwerk in de verbrandingsoven wordt gemaakt met behulp van metselspecie. De specie verhardt na het metselen doordat een zouthydraat ontstaat.

- a Leg uit waarom schade ontstaat aan het metselwerk in een verbrandingsoven als de temperatuur te hoog oploopt.

Een groot aandeel van de verpakkingsmaterialen die uiteindelijk in het afval terechtkomen, is vervaardigd uit pet of polystyreen. Hieronder zijn de structuurformules van pet en van polystyreen schematisch weergegeven.



13.33 Chipszakken zijn nog lastiger afval dan gewone kunststofverpakkingen. Ze hebben een metaallaagje in de verpakking en moeten daarom bij het restafval.

- b Leg zowel voor pet als voor polystyreen uit of het tot de kunststoffen behoort die aan een 'tweede leven' als flesje kunnen beginnen. Geef aan de hand van de structuurformules van pet en polystyreen een verklaring voor je antwoord; verwerk hierin ook de begrippen thermoharder en/of thermoplast.

Bij polymerisaties worden twee verschillende reactie typen onderscheiden: polycondensatie en polyadditie.

- c Geef de structuurformules van de twee monomeren waaruit pet wordt gemaakt en de structuurformule van het monomeer waaruit polystyreen wordt gemaakt. Noteer je antwoord als volgt:
monomeren pet: ...
monomeer polystyreen: ...
- d Leg zowel voor pet als voor polystyreen uit of het polymeer ontstaat door polycondensatie of door polyadditie.

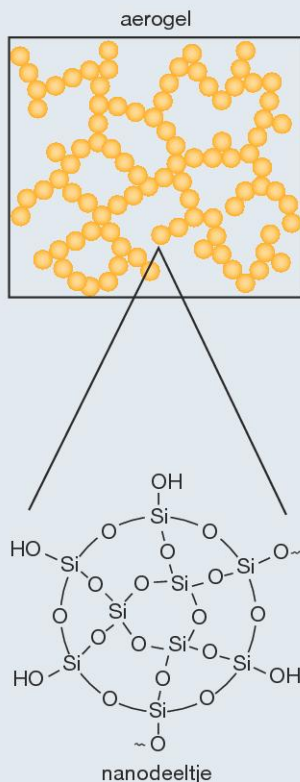
Naar: CE vwo 2012-I

★ 6 Water zuiveren met aerogel

Aerogels zijn materialen met een extreem lage dichtheid. Aerogels hebben een zeer groot inwendig oppervlak, wat ze zeer geschikt maakt als adsorptiemateriaal bij de zuivering van water. De eerste aerogel werd gemaakt op basis van $\text{Si}(\text{OH})_4$. Deze stof werd gemaakt door natriumsilicaat (Na_2SiO_3) aan zoutzuur toe te voegen.

Hierbij reageren de silicaationen met H_3O^+ tot de moleculaire stof $\text{Si}(\text{OH})_4$ en water.

- a Geef de vergelijking van de vorming van $\text{Si}(\text{OH})_4$ uit silicaationen.



13.34 De aerogel

De vorming van een aerogel uit $\text{Si}(\text{OH})_4$ vindt plaats in een organisch oplosmiddel. In het begin van het proces reageren moleculen $\text{Si}(\text{OH})_4$ met elkaar, waarbij Si–O–Si-bindingen worden gevormd onder afsplitsing van water. Hierbij worden in het begin alleen nanodeeltjes gevormd. Vervolgens reageren nanodeeltjes met elkaar via enkele OH-groepen aan het oppervlak van de nanodeeltjes. Hierdoor ontstaat een netwerk van aan elkaar verbonden bolletjes. Door verdamping van het oplosmiddel wordt de aerogel verkregen. In het netwerk zijn moleculen uit lucht aanwezig. Hiernaast is een schematische weergave van een aerogel en een nanodeeltje gegeven (figuur 13.34).

Door andere beginstoffen te kiezen, kan men de grootte van de nanodeeltjes beïnvloeden. Als beginstoffen worden dan $\text{Si}(\text{OH})_4$ en $\text{RSi}(\text{OH})_3$ gebruikt. Een belangrijke voorwaarde voor de keuze van de groep R is dat deze niet met andere groepen R of met OH-groepen kan reageren. Alleen dan zullen deze groepen aan het oppervlak van de nanodeeltjes terecht komen. Als voor de molverhouding $\text{RSi}(\text{OH})_3 : \text{Si}(\text{OH})_4$ een grotere waarde wordt gekozen, worden kleinere nanodeeltjes gevormd.

b Geef een verklaring voor de waarneming dat kleinere nanodeeltjes worden gevormd wanneer de molverhouding $\text{RSi}(\text{OH})_3 : \text{Si}(\text{OH})_4$ groter wordt.

De verhoudingsformule voor een dergelijke aerogel kun je weergeven als $\text{R}_x\text{Si}_y\text{O}_z$. De waarden van x, y en z in deze verhoudingsformule hangen af van de molverhouding waarin $\text{Si}(\text{OH})_4$ en $\text{RSi}(\text{OH})_3$ worden gemengd.

c Leid af wat de waarden voor x, y en z zijn wanneer $\text{Si}(\text{OH})_4$ en $\text{RSi}(\text{OH})_3$ in de molverhouding 1 : 2 reageren. Ga ervan uit dat alle H atomen worden opgenomen in watermoleculen.

Wanneer voor de groep R propylamine $\sim\text{C}_3\text{H}_6\text{--NH}_2$ wordt genomen, is de aerogel geschikt om metaalionen te binden. Bij aerogels met propylaminegroepen aan het oppervlak hangt de hoeveelheid metaalionen die gebonden wordt, sterk af van de zuurgraad.

d Leg uit op microniveau (deeltjesniveau) waarom aerogels met propylaminegroepen aan het oppervlak geschikt zijn om metaalionen te binden.

e Leg uit of te verwachten is dat bij een lage pH-waarde van de oplossing de metaalionen beter, even goed of slechter gebonden zullen worden dan bij een neutrale pH.

Bron: CE vwo 2014-I

Keuzeopdrachten

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

1 Toepassingen van polystyreen

Polystyreen wordt voor veel meer doeleinden gebruikt dan je zo zou denken. Je onderzoekt er een aantal.

2 Kunststoffen en het milieu

Je verdiept je in de belangrijkste milieuproblemen die de productie en het gebruik van kunststoffen met zich meebrengen en bedenkt oplossingen voor deze problemen.

3 Gel

Misschien gebruik je 's morgens voor je naar school gaat haargel om je kapsel in model te krijgen. Ook een gelatinepudding en een zachte contactlens zijn voorbeelden van een gel. In deze opdracht ontdek je de bijzondere bouw en eigenschappen van een gel en je zoekt toepassingen in de ruimtevaart en de geneeskunde.

Overzicht begrippen

Additiepolymerisatie

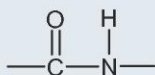
Via additiepolymerisatie kunnen polymeren worden gemaakt. Het additiepolymerisatieproces verloopt in drie stappen: initiatie, propagatie, terminatie.

Bij **1,4-additie** reageren het eerste en het vierde C-atoom van een molecuul waarbij de eerste en de derde binding dubbel is.

Condensatiepolymerisatie

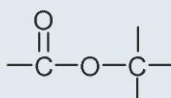
Bij een **condensatiereactie** reageren twee moleculen met elkaar. Hierbij ontstaat een groter molecuul en een klein molecuul. Via condensatiepolymerisatie kunnen polymeren worden gemaakt. Bij dit proces ontstaat er naast het polymeer een andere stof.

Een **amide** bezit de volgende groep:



Een **polyamide** is een **condensatiepolymeer** waarin de bovenstaande groep aanwezig is.

Een **ester** bezit de volgende groep:



Een **polyester** is een **condensatiepolymeer** waarin de bovenstaande groep aanwezig is.

Een **hydrolysereactie** is een ontledingsreactie van een stof door water.

Polymeer

Kunststoffen zijn polymeren. Het zijn grote moleculen die zijn opgebouwd uit monomeren. Polymeren kunnen worden gemaakt door middel van additiepolymerisatie of condensatiepolymerisatie.

Polymeren bestaan uit een mengsel van moleculen met verschillende ketenlengtes. Ze hebben een **gemiddelde ketenlengte** en een **gemiddelde molecuulmassa**.

Een polymeer dat is opgebouwd uit meerdere soorten monomeren noemt je een **copolymeer**.

De **polymerisatiegraad** is het aantal monomeereenheden in een polymeermolecuul. Hoe meer dit er zijn, hoe stugger de kunststof wordt.

Thermoharder

Een thermoharder blijft hard bij verwarmen. Er zijn dan tussen de polymeermoleculen **cross-links** aanwezig. Er vormt zich een **netwerkpolymeer**.

Thermoplast

Een thermoplast is een kunststof die zacht wordt bij verwarmen. De stof bestaat uit lange polymeermoleculen.

Uv-stabilisator

Polymeren worden vaak gemengd met een uv-stabilisator die de **uv-straling** absorbeert voordat ze de polymeerketens bereikt of die de radicalen onschadelijk maakt die ontstaan onder invloed van uv-straling.

Weekmaker

Weekmakers zijn stoffen die aan een kunststof worden toegevoegd om deze minder stug te maken.

14 Nieuwe materialen

Inhoud

14.1 Metalen en legeringen
Experiment:
14.1 Nitinol

14.2 Slimme polymeren
Experiment:
14.2 Silly Putty

14.3 Keramische materialen

14.4 Nanotechnologie

Afsluiting

Overzicht begrippen





Sterker dan staal

Geïnspireerd door de structuur van kleine koraalorganismen, hebben onderzoekers van de universiteit van Massachusetts (MIT) grafen eenzelfde structuur gegeven. Het resultaat is een nieuw materiaal dat tien keer sterker is dan staal bij een dichtheid van vijf procent van die van staal.

14

Iter

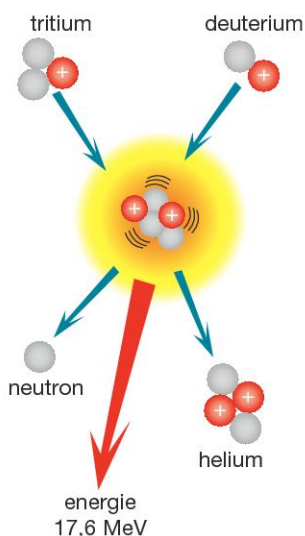
Door het opraken van fossiele brandstoffen wordt naar nieuwe mogelijkheden gezocht voor energieproductie. Kernfusie is daar een van. Iter is een project voor de bouw van een kernfusiereactor in Zuid-Frankrijk, die je hier in aanbouw ziet. Door de extreme omstandigheden waarbij kernfusie verloopt worden er hoge eisen gesteld aan de materialen waarvan zo'n reactor wordt gemaakt.



Je leert

- een verband leggen tussen contexten en concepten in relatie met metalen;
- eigenschappen van metalen op micro- en mesoniveau verklaren;
- de invloed van roosterfouten op de eigenschappen van metalen.

14.1 Metalen en legeringen



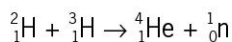
14.1 Kernfusiereactie tussen een deuteriumkern en een tritiumkern. Er ontstaat per reactie een heliumkern, een neutron en 17,6 megaelektronvolt.

Metalen in extreme omstandigheden

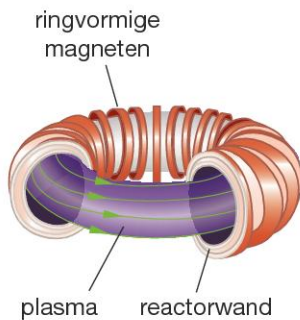
Om een indruk te krijgen van de eisen die je aan het materiaal van de wanden bij kernfusiereactoren moet stellen, moet je eerst iets weten over de omstandigheden waaronder kernfusiereacties verlopen.

Een zeer succesvolle fusiereactor is de zon. In het centrum van de zon verlopen bij een druk van 10 miljard bar en een temperatuur van 15 miljoen kelvin fusiereacties, waarbij enorme hoeveelheden energie vrijkomen. Deze zonne-energie maakt alle leven op aarde mogelijk. De combinatie van extreme omstandigheden op de zon kan op aarde niet worden gerealiseerd. Een **kernfusiereactie** die wel op aarde kan verlopen is de reactie van deuterium, de H-2 isotoop van waterstof, met tritium, de H-3 isotoop van waterstof.

De fusiereactie die verloopt tussen deuterium en tritium zie je in figuur 14.1. De vergelijking van de reactie is:



Deze fusiereactie heeft een zeer hoge activeringsenergie. Dat wil zeggen dat de temperatuur in de reactor heel hoog moet zijn, ongeveer 150 miljoen kelvin. Bij deze hoge temperatuur zijn de botsingen tussen deuterium en tritium dermate heftig dat de atomen hun elektron verliezen en er een mengsel ontstaat van positief geladen kernen en losse elektronen. Als er voldoende atomen zijn geïoniseerd veranderen de eigenschappen van het gas en spreek je niet langer van een gas, maar van een plasma. Een plasma geleidt in tegenstelling tot gasen elektrische stroom en reageert op magneetvelden.



14.2 De ronde vorm van de fusiereactor is ook te herkennen op de bouwplaats van Iter.

Plasma wordt wel de vierde toestand genoemd naast vaste stof, vloeistof en gas. Op aarde zijn de bliksem en het noorderlicht (figuur 14.3) voorbeelden van plasma's. Onder minder extreme omstandigheden dan bij kernfusie kun je ook een plasma maken; zo wordt de metaallaag aan de binnenkant van een chipszak ook aangebracht met een plasma.

De kernfusiereactor heeft de vorm van een donut, zie figuur 14.2. In de ring bevindt zich het plasma, dat door de sterke koperen magneetringen in bedwang wordt gehouden. De wand van de reactor moet bestand zijn tegen zeer hoge temperaturen. De temperatuur aan de buitenrand van het plasma is nog altijd zo'n 6000 K en het is dus niet eenvoudig om materialen voor de wand van de kernfusiereactor te ontwikkelen.

Bij het *Dutch Institute for Fundamental Energy Research* (DIFFER) hebben wetenschappers onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van het metaal wolfram als wand van een reactor. Wolfram is een hard materiaal met een smeltpunt van 3695 K. Dat is onvoldoende om een reactorwand van te maken die lang mee gaat. Ze testten een wand van wolfram die aan de kant van het plasma een wat sponsachtige structuur heeft waarin vloeibaar tin zit. Door deze structuur kan vloeibaar tin naar buiten stromen. Als gevolg van de hitte verdampt het tin en vormt een soort damp laag vóór de wand. De damp adsorbeert en verdeelt de warmte van het plasma. Bijkomend voordeel is dat de bescherm laag vanzelf dikker wordt op het moment dat de temperatuur stijgt en er meer tin verdampt.

Edelheid van metalen

Bij het ontwerpen van een reactorwand maak je gebruik van de macroscopische eigenschappen van metalen zoals onder andere het smelt- en kookpunt van wolfram en tin. Bij andere toepassingen van metalen zijn weer andere eigenschappen van belang zoals bijvoorbeeld de edelheid, het geleidingsvermogen of de buigzaamheid.

Zo geeft de **standaardelektrodepotentiaal**, die bij de redoxreacties is behandeld, informatie over de **edelheid van metalen**. Je kunt de edelheid van een metaal afleiden uit de grootte van de standaardelektrodepotentiaal. Hoe groter die potentiaal, des te edeler is het metaal. Als een metaal minder edel is, is het ook gevoeliger voor **corrosie**. Bij het toepassen van een metaal moet je vaak rekening houden met de corrosiegevoeligheid.

In tabel 14.4 op de volgende bladzijde staat nog eens een aantal metalen met de bijbehorende standaardelektrodepotentialen.



14.3 Het noorderlicht is ook een plasma.

edelheid	metaal	halfreactie	V_0
edel	goud	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3 \text{e}^-$	+1,50 V
	platina	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2 \text{e}^-$	+1,20 V
halfedel	kwik	$\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}^+ + \text{e}^-$	+0,80 V
	koper	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^-$	+0,34 V
onedel	ijzer	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,45 V
	chroom	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3 \text{e}^-$	-0,74 V
zeer onedel	aluminium	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^-$	-1,66 V
	magnesium	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-2,37 V

14.4 Edelheid en standaardelektrodepotentialen van een aantal metalen



a



b

14.5 Poedercoaten van een hek (a) en gepoedercoate fietsframes (b)

Metalen die gevoelig zijn voor corrosie moeten daartegen vaak worden beschermd.

Hoewel chroom en aluminium een lagere elektrodepotentiaal hebben en dus ook onedeler zijn dan ijzer hoeven ze niet extra te worden beschermd tegen corrosie. Chroom en aluminium vormen een zeer dun laagje chroomoxide en aluminiumoxide, die het materiaal afsluiten voor invloeden van buiten en voor verdere aantasting. Ook wolfram vormt een beschermend laagje wolframoxide.

Ijzer vormt een laagje ijzeroxide, maar het ijzeroxide is niet in staat om ijzer af te sluiten voor verdere aantasting en ijzer moet dus op een andere manier worden beschermd tegen corrosie.

Mogelijkheden om metalen te beschermen tegen corrosie zijn bijvoorbeeld:

- afdekken met een verflaag;
- het afdekken van een metaal met een laagje van een ander metaal, bijvoorbeeld zink, dat net als aluminium en chroom een beschermend laagje zinkoxide vormt;
- poedercoaten: het te beschermen voorwerp wordt elektrisch geaard. Op het voorwerp wordt een laag elektrostatisch geladen poederverf aangebracht. De poederverf wordt aangetrokken door het geaarde voorwerp en verspreidt zich egaal over het hele voorwerp. Het voorwerp wordt daarna in de oven gebracht waar de poeder uiteindelijk uithardt tot een vaste dunne laag verf (figuur 14.5a en b).

Geleiding en buigzaamheid van metalen

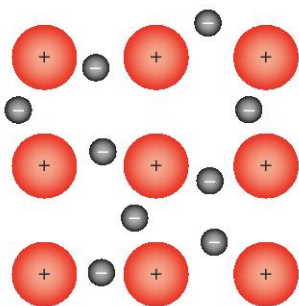
Metalen kennen veel toepassingen door het goede geleidingsvermogen. Geleiding is een macroscopische eigenschap die je in klas 4 al hebt leren verklaren vanuit het microniveau. Een metaal bestaat uit positief geladen metaalionen, omringd door negatief geladen, vrij bewegende valentie-elektronen (figuur 14.6). De vrij bewegende valentie-elektronen zorgen ervoor dat metalen goede geleiders van elektriciteit zijn. Ook spelen deze vrij bewegende elektronen een rol bij de goede geleiding van warmte in metalen.

De aantrekkingskracht tussen de geladen deeltjes, de **metaalbinding**, is heel sterk. Je zag al dat het smeltpunt van wolfram 3695 K was, ijzer moet je tot 1811 K verhitten voor het smelt.

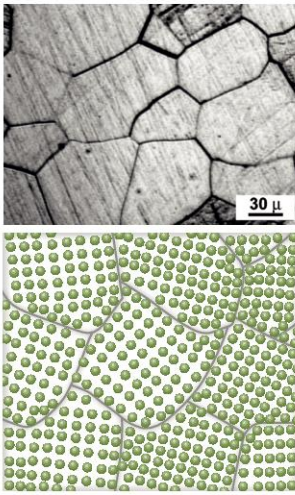
Een andere macroscopische eigenschap van metalen is buigzaamheid. Deze eigenschap kun je niet verklaren vanuit het microniveau. Je moet nu ook kijken naar het **mesoniveau**, naar de wijze waarop de deeltjes van het microniveau zijn gegroepeerd.

Op mesoniveau vormen metalen kleine kristallen, groepjes van metaalionen. Deze hebben een metaalrooster, maar het metaalrooster van het ene kristal sluit niet precies aan op het metaalrooster van een ander kristal, zie figuur 14.7. Met de kristalstructuur kun je verklaren waardoor je metalen goed kunt vervormen en bewerken.

Als je voldoende kracht uitoefent op een stukje metaal, verschuift een laag positief geladen metaalionen in het metaalrooster van een kristal. De negatief geladen valentie-elektronen bewegen hier tussendoor en houden de metaalionen op hun nieuwe plaats bij elkaar.



14.6 Modelvoorstelling van het metaalrooster van een metaal met elektrovalentie 1



14.7 Vergrote foto en modelvoorstelling van metaalkristallen

Het buigen van een zuiver metaal gaat gemakkelijk zolang de beweging door verschuivingen in de metaalkristallen wordt doorgegeven. Op het grensvlak van de metaalkristallen is het rooster echter niet perfect geordend en kunnen de verschuivingen niet goed worden doorgegeven. Tussen de kristallen ontstaat weerstand tegen het verbuigen. Als je een metaal walst of smeedt met een hamer, ontstaan er steeds meer kleinere kristallen en steeds meer grensvlakken. Daarnaast wordt door deze bewerkingen ook in de kristallen zelf het metaalrooster verstoord. Er ontstaan roosterfouten in het kristal. Door de toename van het aantal grensvlakken en roosterfouten kunnen de lagen metaalionen steeds minder goed langs elkaar schuiven en wordt het metaal harder en moeilijker te buigen. Door het metaal vervolgens voorzichtig te verhitten, smelt een deel van de kleine kristallen weer samen tot grote kristallen met minder roosterfouten. Het metaal heeft weer minder grensvlakken en wordt daardoor minder hard. Het kan dan nog platter worden gewalst of verder gesmeed (figuur 14.8).



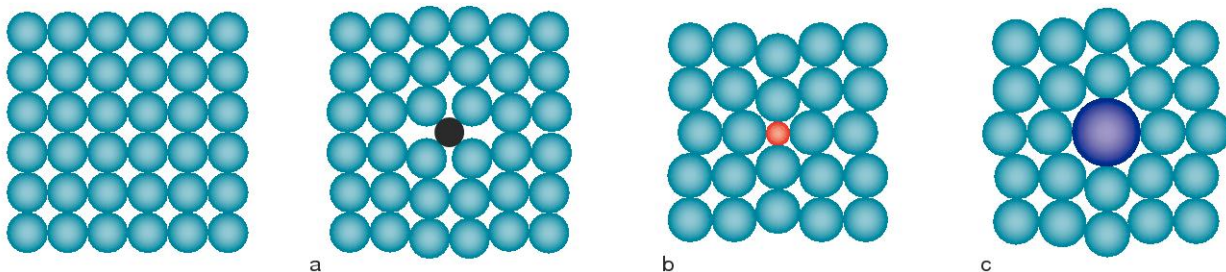
14.8 Het walsen van staal tot steeds dunnere platen

Legeringen

Zuivere metalen zijn vaak vrij zacht en daardoor ongeschikt om zo te gebruiken. Een ring van puur goud krijgt gemakkelijk krassen en deuken. Daarom worden **legeringen** gebruikt die minder gemakkelijk vervormen en beschadigen.

Door veranderingen in het metaalrooster aan te brengen verander je de eigenschappen van het metaal op macroniveau. Bij een legering is een deel van de metaalatonen vervangen door andere atomen die iets groter of kleiner zijn. In figuur 14.9 is in model a een kleiner atoom tussen de andere atomen geplaatst, in model b en c is een atoom vervangen door een kleiner en een groter atoom.

Op mesoniveau gezien zorgen deze atomen voor verstoringen van het metaalrooster, ze veroorzaken dus **roosterfouten**. Hierdoor wordt het verschuiven van de lagen in de metaalkristallen veel moeilijker (figuur 14.9). Dit verklaart waardoor legeringen meestal harder zijn dan zuivere metalen.



14.9 Model van een metaalrooster dat wordt vervormd door de aanwezigheid van kleinere of grotere atomen



14.10 Deze enorme roestvrij stalen bloem van Eduardo Catalana staat in Buenos Aires in Argentinië. Overdag is hij open en 's nachts sluit de bloem zich.

● Experiment 14.1

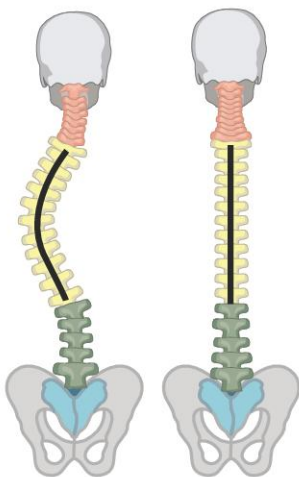
Een voorbeeld van een harde legering is de legering van ijzer met koolstof. Als ijzer meer dan 2% koolstof bevat, wordt het zo hard dat je het nauwelijks meer kunt vervormen. Het wordt zelfs **bros**. Dat betekent dat het zal barsten wanneer je het met een hamer bewerkt. Je kunt het alleen in de gewenste vorm krijgen door het te gieten in een vorm (mal). IJzer met een hoog percentage koolstof wordt dan ook gietijzer genoemd. Je komt het op straat tegen in de vorm van hekwerken en als putdeksels.

Legeringen kunnen een mengsel van twee metalen zijn zoals messing, een mengsel van koper en zink, maar ook een mengsel van meerdere metalen. Zo is roestvrij staal een legering van ijzer met 10 tot 17% chroom en 6 tot 36% nikkel en minder dan 1% koolstof. Het is roestvrij omdat het chroom in de legering een dun laagje chroomoxide op de legering vormt (figuur 14.10). Door te variëren in de hoeveelheden chroom en nikkel in de samenstelling van de legering kun je de eigenschappen verkrijgen die je nodig hebt voor een bepaalde toepassing.

Bijzondere legeringen

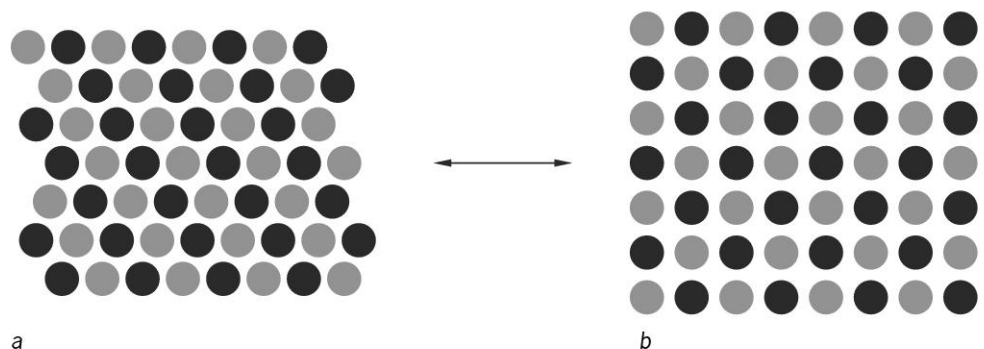
Sommige materialen met bijzondere eigenschappen worden 'smart materials' genoemd. Een voorbeeld van een 'smart metal' is nitinol, een legering van nikkel en titaan in ongeveer gelijke hoeveelheden. Dit **geheugenmetaal** kun je bij 500 °C de gewenste vorm geven, bijvoorbeeld de vorm van een theelepeltje. De legering 'onthoudt' deze vorm. Als je het lepeltje vervolgens afkoelt, kun je het met enige kracht verbuigen en verdraaien, net als bij gewone theelepeltjes. Het bijzondere is dat het lepeltje van nitinol terugschiet in zijn originele vorm als je het weer verwarmt. Je hoeft het dan niet te verwarmen tot 500 °C, een kopje thee is warm genoeg.

Voor nitinol zijn er twee mogelijke kristalroosters, de je **martensiet** en **austeniet** noemt, zie figuur 14.11. Je ziet in de figuur dat in het martensiet de atomen dichter bij elkaar zitten dan in het austeniet. Bij flink verwarmen gaan de atomen in het austenietrooster zitten en bij die temperatuur geef je het materiaal de gewenste vorm. Koel je het materiaal af onder bijvoorbeeld 20 °C, dan gaat het over naar het martensiet. Het martensiet blijkt een flexibel rooster te zijn waarin je het materiaal kunt vervormen. Bij een geringe opwarming gaat het materiaal terug naar de vorm die het bij de hoge temperatuur heeft gekregen.



14.12 Het rechtzetten van een kromme rug met nitinol. De zwarte streep geeft de nitinolstaaf aan.

Een voorbeeld van een toepassing is het rechtzetten van een gekromde ruggengraat. Bij hoge temperatuur wordt een dunne rechte staaf van nitinol gemaakt. Bij afkoelen ontstaat het flexibele martensietrooster. Een chirurg vervormt bij de operatie het martensiet bij lage temperatuur tot de kromme vorm van de ruggengraat en bij het langzaam opwarmen in het lichaam gaat het nitinol weer over naar het austenietrooster. De rechte staaf trekt dan de rug recht (figuur 14.12).

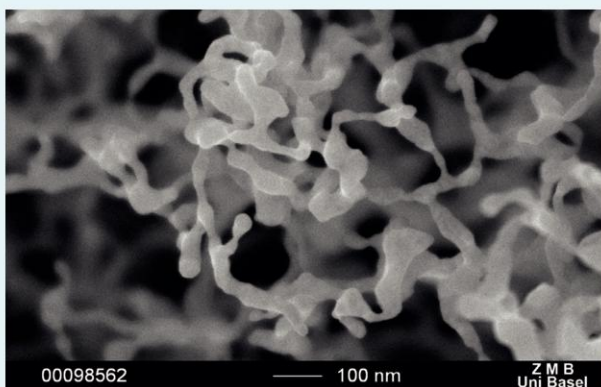


14.11 Vereenvoudigd model van het rooster van martensiet (a) en het rooster van austeniet (b). De zwarte atomen zijn nikkel en de grijze atomen zijn titaan.

Sponzige nanostructuren van metalen

Sponsachtige nanostructuren van metalen lijken een geschikt materiaal voor de productie van *solar fuels*. Dit zijn 'zonnebrandstoffen' waarbij zonne-energie in chemische bindingen wordt opgeslagen.

Bij het onderzoeksinstituut DIFFER in Eindhoven hebben wetenschappers een plaatje wolfram gebombardeerd met heliumplasma. Je hebt al gezien dat plasma een gas is dat bestaat uit positieve ionen en negatieve elektronen. Heliumplasma bestaat dus uit positieve heliumionen en elektronen. Door ophoping van helium in het metaaloppervlak ontstaan bellen, die openbreken in een schuimachtige structuur. In figuur 14.13 zie je een opname van wolfram na het bombardement met het plasma. Het wolfram met die poreuze structuur laat men reageren met zuurstof tot wolfram(VI)oxide. De sponsstructuur is dan geschikt om in een zogenaamde foto-elektrochemische cel met zonne-energie chemische reacties te laten verlopen.



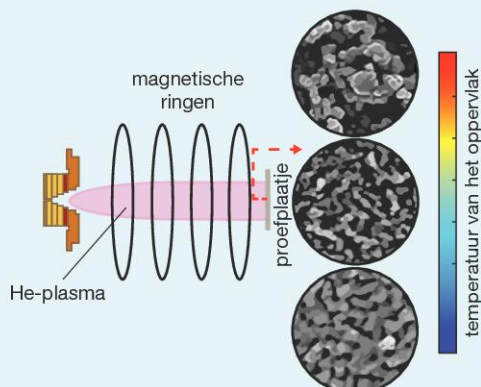
14.13 Een bombardement van heliumplasma geeft wolfram deze schuimstructuur.

Door de grote oppervlakte van het wolfram is het een zeer efficiënte methode, die veel meer energie per vierkante centimeter kan produceren dan gewone zonnecellen.

Omdat wolfram relatief zeldzaam is en dus kostbaar, is in vervolgonderzoek gekeken of ook het goedkope en overal verkrijgbare ijzer geschikt is om met deze methode een sponsstructuur te krijgen. De resultaten zijn uitstekend, ook bij ijzer ontstaat de sponsachtige oppervlakte.

Met behulp van deze nieuwe structuren wil men de zonne-energie gebruiken om er waterstof mee te maken, maar ook om CO_2 om te zetten in CO en om daaruit met waterstof methaan te produceren. Het op deze wijze geproduceerde methaan is een voorbeeld van een *solar fuel*.

Bron: DIFFER en NWO-I



14.14 Schematische weergave van het maken van de sponsachtige nanostructuur op een ijzeren proefplaatje

● Opdracht B9

Samenvatting

- De edelheid van metalen wordt bepaald door de reductorsterkte. Edele metalen hebben een hoge standaardelektrodepotentiaal, onedele metalen een lage.
- Onedele metalen worden beschermd tegen corrosie door bijvoorbeeld een verf- of poederlaagje of een beschermend oxidelaagje.
- Geleidbaarheid en buigzaamheid zijn eigenschappen van metalen op macroniveau. Geleidbaarheid kun je op microniveau verklaren; voor buigzaamheid heb je ook het mesoniveau nodig.
- Bij legeringen ontstaan verstoringen in het metaalrooster waardoor de eigenschappen van het materiaal kunnen worden beïnvloed.
- Een 'smart material' is een stof waarvan je een of meer eigenschappen kunt veranderen onder invloeden van buitenaf.

Opdrachten

A 1

Waardoor geleidt het plasma van deuterium en tritium wel elektrische stroom en het gasmengsel van deuterium en tritium niet?

B 2

- a Noem drie eigenschappen van metalen op macroniveau.
- b Beschrijf op microniveau het verschil tussen een legering en een zuiver metaal.
- c Leg uit wat er op mesoniveau gebeurt met de kristalstructuur van ijzer bij koud walsen of smeden met een hamer.

B 3

Voor de fusiereactie zijn deuterium en tritium nodig. Deuterium komt in ruime hoeveelheden in water voor. In water (H_2O) zijn in een aantal watermoleculen één of twee waterstofatomen vervangen door een deuteriumatoom (D). Eén op de 6800 waterstofatomen op aarde is een deuteriumatoom.

- a Geef de notatie voor water als er één en als er twee waterstofatomen zijn vervangen door een deuteriumkern.

Tritium is een radioactieve stof met een korte halveringstijd van 12,3 jaar. Vanwege de korte halveringstijd komt tritium niet op aarde voor. Op aarde komt echter voldoende lithium voor, een licht metaal waaruit je tritium kunt maken door het te beschieten met neutronen.

- b Leg uit wat de halveringstijd is van een radioactieve stof.
- c Geef de reactievergelijking voor het ontstaan van tritium uit de Li-6 isotoop. Bij deze reactie ontstaat ook helium.

De fusiereactie heeft een zeer hoge activeringsenergie.

- d Teken het energiediagram voor de fusiereactie.

B 4

Bij de fusiereactie komt per effectieve botsing 17,6 MeV (megaelektronvolt) aan energie vrij. 1 eV komt overeen met $1,60 \cdot 10^{-19}$ J. Bereken hoeveel energie in joule er vrijkomt als 1 mol deuterium reageert met 1 mol tritium.

B 5

Bij het onderzoek van DIFFER wordt een combinatie van wolfram met tin voor de wand gebruikt.

- a Wat kun je zeggen over het kookpunt van tin, als je het wilt gebruiken in deze combinatie?

De wand van wolfram en tin wordt wel een 'zelfherstellende' wand genoemd.

- b Beredeneer waarom je dat zo kunt benoemen.

B 6

Als bestek van ijzer zou zijn, zou het gemakkelijk beschadigen en snel roesten. Daarom wordt het meestal gemaakt van roestvrij staal. Dit is ijzer met maximaal 2% koolstof en minimaal 12% chroom.

- a Zoek in Binas de atoomstralen op van ijzer, chroom en koolstof.
- b Maak een modeltekening waarin je laat zien wat op microniveau de bouw van een stukje roestvast staal is. Geef de atomen weer als bolletjes zoals in figuur 14.9.
- c Geef een verklaring op mesoniveau voor de hardheid van roestvrij staal.

B 7

Er zijn edele, halfedele, onedele en zeer onedele metalen. Kalium is een zeer onedel metaal. Het reageert heftig met water.

- a Stel met behulp van de halfreacties uit Binas tabel 48 de reactievergelijking van deze redoxreactie op.

Lood is een voorbeeld van een onedel metaal. Het reageert niet met water, maar wel met zure oplossingen zoals zoutzuur.

- b Stel met behulp van de halfreacties de reactievergelijking van deze redoxreactie op.

B 8

Titaan is een licht en sterk metaal dat nauwelijks wordt aangetast door corrosie. Het wordt veel gebruikt in de lucht- en ruimtevaart. Hoewel titaan een van de meest voorkomende elementen in de aardkorst is, is het een duur metaal doordat er zuiver magnesium nodig is bij de productie van titaan. Titaan is een zeer onedel metaal, maar toch bestand tegen corrosie.

- a Geef hiervoor een mogelijke verklaring.
- b Beredeneer waardoor de productie van titaan zo duur is.

B 9

Lees de tekst in het kader 'Sponsachtige nanostructuren van metalen' en beantwoord de volgende vragen. Het wolfram wordt gebombardeerd met heliumplasma en krijgt dan de sponsstructuur.

- a Geef de formules van de deeltjes in het heliumplasma.

In de foto-elektrochemische cel ontstaan in het wolfram(VI) oxide onder invloed van zonne-energie elektronen en ‘zogenaaemde’ positieve gaten. De elektronenstroom die ontstaat wordt direct gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof.

- b** Geef de reactievergelijking van deze reactie.
- c** Wat is het verschil tussen een zonnecel en een foto-elektrochemische cel?

Het is ook mogelijk om in de cel CO_2 om te zetten in CO en dit met de geproduceerde H_2 te laten reageren tot methaan.

- d** Geef de reactievergelijkingen van dit proces.

C 10

Het maken van nitinol als geheugenmetaal moet nauwkeurig verlopen. Nikkel- en titaanatomen moeten in een gelijke molverhouding aanwezig zijn, anders vormt zich niet het juiste kristalrooster. Er mogen ook geen andere atomen in het kristalrooster worden ingebouwd, want dit leidt tot ongewenste roosterfouten.

- a** In welke massaverhouding moeten nikkel en titaan worden gemengd om nitinol te krijgen?
- b** Leg uit waardoor roosterfouten leiden tot geheugenverlies bij nitinol.

De temperatuur waarbij martensiet weer overgaat in austeniet ligt tussen de $-20\text{ }^\circ\text{C}$ en de $+60\text{ }^\circ\text{C}$. Een kleine verandering in de samenstelling van nitinol heeft grote invloed op de overgangstemperatuur waarbij martensiet overgaat in austeniet.

- c** Bedenk een toepassing van nitinol waarvoor een hogere overgangstemperatuur nodig is en een toepassing waarvoor die temperatuur juist laag moet zijn.

C 11 Metaalmoeheid ★

Metaalmoeheid is een groot probleem bij vliegtuigen. Tijdens elke vlucht wordt het aluminium flink belast. Er kunnen na verloop van tijd kleine gaatjes in het metaalrooster ontstaan. Deze kunnen uitgroeien tot scheurtjes. Het metaal verliest hierdoor zijn sterkte, met levensgevaarlijke gevolgen.

Daarom worden vliegtuigen regelmatig gecontroleerd op metaalmoeheid. Australische onderzoekers hebben een legering van aluminium met een beetje koper ontwikkeld met een zelfherstellend vermogen. De koperatomen verstoren het kristalrooster van aluminium.

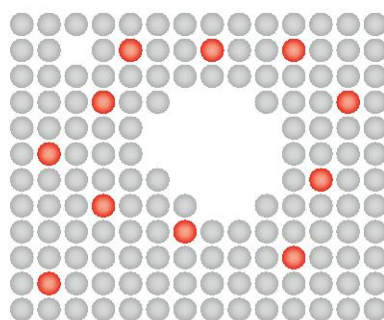
Bij ongeveer $60\text{ }^\circ\text{C}$ kunnen de koperatomen een beetje door het metaalrooster van aluminium bewegen. Als in het aluminium een klein gaatje ontstaat, worden de koperatomen langs de aluminiumatomen hierheen geduwd.

Ze vullen het gat op voordat een scheur kan ontstaan. Dit proces verloopt bijna vanzelf, je moet alleen wel af en toe naar het warme zuiden vliegen. In vliegtuigen wordt geen zuiver aluminium verwerkt, maar altijd een legering.

- a** Leg uit waardoor zuiver aluminium ongeschikt is voor vliegtuigen.
- b** Geef aan of deze nieuwe legering beschouwd mag worden als een ‘smart metal’.

In figuur 14.15 is een model op mesoniveau getekend van deze legering met een beginnend gaatje. De koperatomen zijn in rood weergegeven.

- c** Maak een vergelijkbare voorstelling als het aluminium een tijd in de hete zon heeft gestaan.



14.15 Modeltekening van zelfherstellend aluminium

Experiment

14.1 Nitinol

In dit experiment ontdek je zelf de eigenschappen van nitinol.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- vanuit een wetenschappelijk onderzoek de toepassing van een metaal verklaren;
- de corrosiegevoeligheid van metalen verklaren met behulp van de standaardelektrodepotentiaal en methoden aangeven om metalen tegen corrosie te beschermen;
- van metalen de geleidbaarheid en de buigzaamheid verklaren;
- op mesoniveau verklaren wat de invloed is van roosterfouten en grensvlakken op de hardheid van metalen;
- aan de hand van voorbeelden uitleggen wat wordt verstaan onder ‘smart materials’.

Nooit meer een lekke band

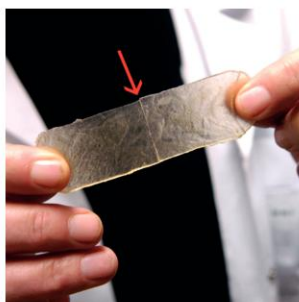
Wetenschappers hebben rubber ontwikkeld dat zichzelf bij een beschadiging kan repareren. De plek waar de breuk heeft gezeten is na een tijdje wachten weer net zo sterk als voordat de breuk optrad.

In de toekomst is het dus niet meer zo erg als je een lekke band hebt.

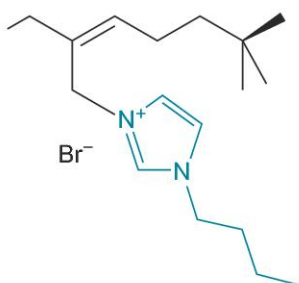
**Je leert**

- vanuit een context eigenschappen van polymeren verklaren met micro- en mesoniveau;
- wat geleidende polymeren zijn;
- de structuur en eigenschappen van composieten met metalen.

14.2 Slimme polymeren



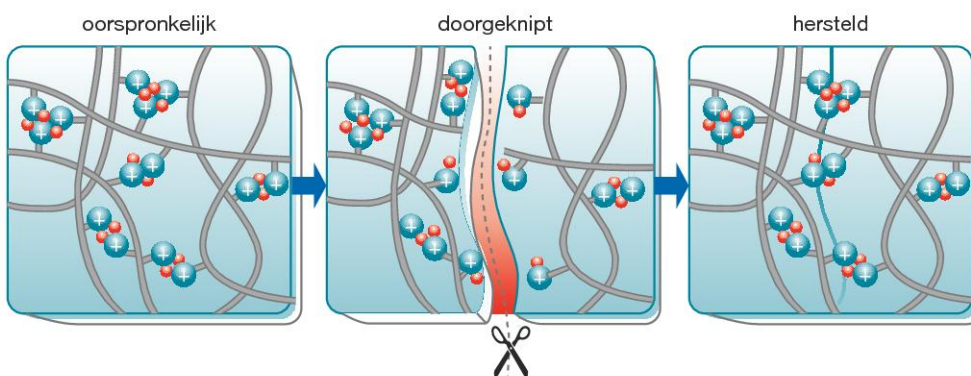
14.16 Een reepje zelfherstellend rubber



14.18 Polymeer op microniveau met positief geladen groep en een Br^- -ion

Zelfherstellend rubber

Zelfherstellend rubber is een voorbeeld van een slim polymeer. Als het rubber in een fietsband een gaatje krijgt, dan worden op microniveau bindingen verbroken. Als de randen van het rubber tegen elkaar aan blijven, dan worden weer nieuwe bindingen gevormd. Dat kunnen afhankelijk van de soort rubber atoombindingen zijn, maar ook waterstofbruggen of ionbindingen. In figuur 14.16 zie je een reepje rubber dat na doorknippen weer aan elkaar zit. In figuur 14.17 zie je een model van een stukje polymeer op mesoniveau waarin ionbindingen zorgen voor zelfherstellend vermogen. De draden zijn polymeerketens en de zijgroepen bevatten positieve ladingen (figuur 14.18), die bij elkaar worden gehouden door 'vrije' negatieve ladingen, bijvoorbeeld broomionen.



14.17 Polymeerdeel op mesoniveau met positieve en negatieve ladingen

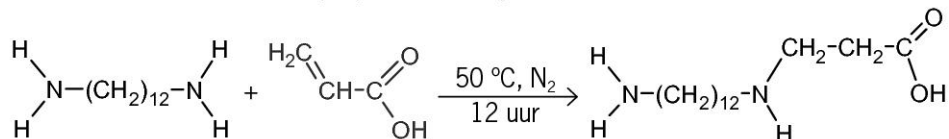


14.19 Zelfherstellende polymeren maken de constructie lichter en zorgen ervoor dat windmolens langer meegaan.

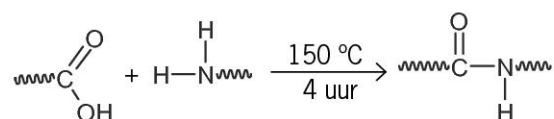
In figuur 14.17 op de vorige bladzijde herstelt het rubber zich door het vormen van ionbindingen. Het zelfherstellende rubber in het volgende voorbeeld is een netwerkpolymeer met vrije reactieve groepen: zuurgroepen en aminogroepen, maar ook veel N-H- en C=O-groepen die nog waterstofbruggen kunnen vormen of ontvangen. Bij deze rubbersoort worden dus tijdens het herstellen nieuwe atoombindingen en waterstofbruggen gevormd.

De vorming van dit rubber verloopt in een aantal stappen.

Stap 1: De vorming van het rubber is de reactie van een alkaandiamine, bijvoorbeeld dodecaan-1,12-diamine, met propeenzuur (acrylzuur).

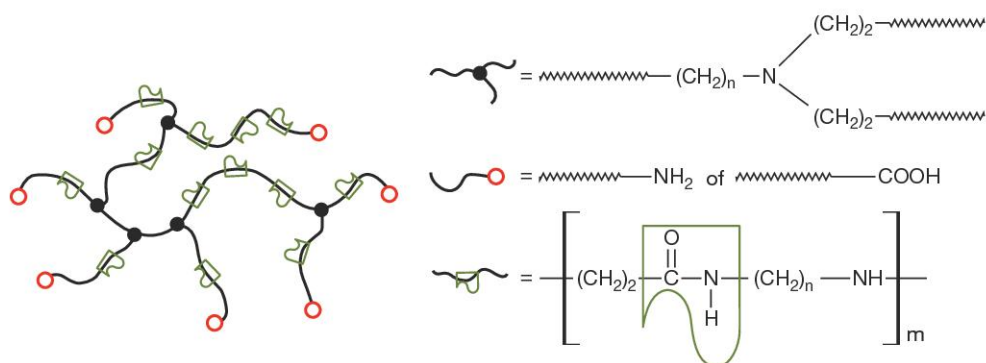


Stap 2: Hier reageren aminogroepen van het ene molecuul van het reactieproduct met zuurgroepen van een ander molecuul; zo ontstaan amidebindingen. Deze reactie is hieronder verkort weergegeven.



Het oorspronkelijk diamine bevat vier N-H-groepen. Deze kunnen allemaal met het zuur reageren. Zo ontstaat een netwerk, zie figuur 14.20. Op de knooppunten zit een stikstofatoom, dat zijn de zwarte bolletjes. Niet alle zuur- en aminogroepen hebben gereageerd, waardoor het polymeer nog vrije reactieve groepen bevat. Dat zijn de rode rondjes. De C=O- en N-H-groepen in de amidebindingen zijn in figuur 14.20 in groen weergegeven, deze vormen waterstofbruggen, zie de legenda.

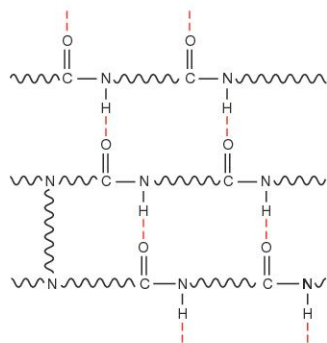
Stap 3: De stof is nu nog vloeibaar en wordt 32 uur verhit tot 160 °C. Daardoor reageren meer vrije aminogroepen en zuurgroepen met elkaar en wordt de stof vast.



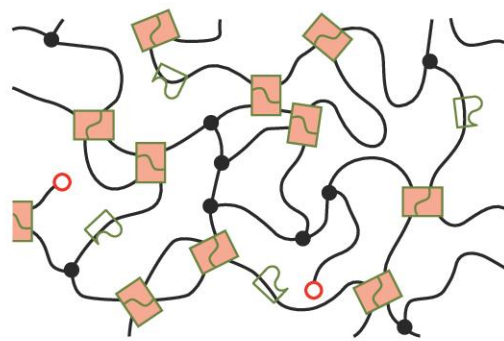
14.20 Een deel van het rubberpolymeer weergegeven op mesoniveau met rechts de legenda op microniveau

Het netwerkpolymeer wordt bij elkaar gehouden door atoombindingen (amide) en waterstofbruggen (tussen de amidebindingen), zie figuur 14.21a op de volgende bladzijde.

In figuur 14.21b zie je de schematische weergave van het polymeer op mesoniveau. Het bevat nog steeds vrije reactieve groepen (rode rondjes) en groepen die geen waterstofbruggen hebben gevormd (groene niet-gearceerde vormpjes). Beide soorten groepen zorgen voor het Herstellend vermogen van deze rubbersoort.



14.21a Het netwerk met H-bruggen



14.21b Op mesoniveau zie je nog reactieve groepen.

Oled

Een ander soort slimme polymeer is verwerkt in oleds (organische licht emitterende diodes). Deze zijn het meest bekend van beeldschermen en displays en vormen daarmee een concurrent voor traditionele lcd-schermen. Lcd-schermen hebben achtergrondverlichting nodig, oledschermen niet en ze verbruiken daardoor minder energie. Het oledmateriaal zendt zelf licht uit en zo kunnen de beeldschermen ook bij grote formaten zeer dun worden uitgevoerd. Er zijn al oledtelevisies met de dikte van een muntstuk. Ook kan het scherm nu worden gebogen (figuur 14.22a en b).

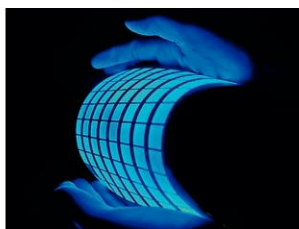


a



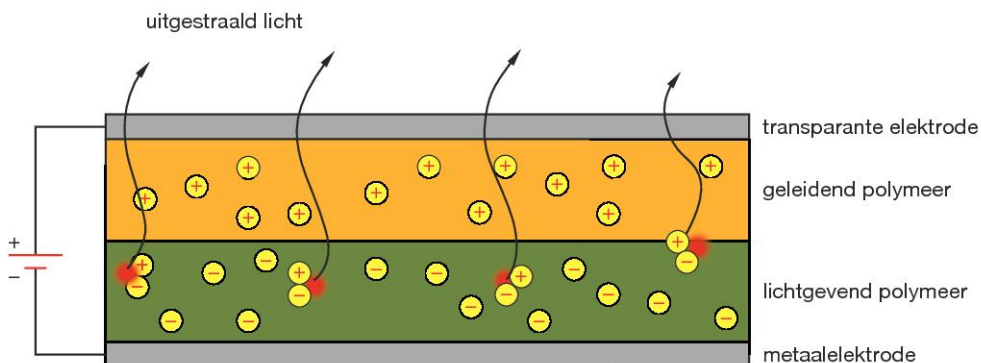
b

14.22 Een gebogen oledscherm (a) en een heel plat scherm (b)



14.24 Een blauw oledscherm

Oleds maken gebruik van slimme polymeren die onder invloed van elektrische stroom kunnen geleiden en van polymeren die onder invloed van stroom licht kunnen geven. Een oled is opgebouwd uit drie lagen, zie figuur 14.23. De onderste laag is hier een metaal-elektrode, de negatieve pool en de bovenste laag is een transparante elektrode met daaraan vast een **geleidend polymeer**. Dit is de positieve pool. Hiertussen bevindt zich een laag met **lichtgevende polymeren**. Als er een spanningsbron wordt aangesloten nemen deze polymeren aan de onderkant elektronen uit het metaal op en er ontstaat een negatieve lading. Aan de bovenkant staan ze elektronen af en daar ontstaan 'gaten' met een positieve lading.



14.23 Een schematische tekening van een oled

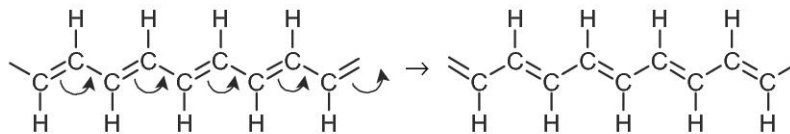
Als de negatieve geladen elektronen het positief geladen gat opvullen komt de opgenomen elektrische energie vrij in de vorm van licht dat door de bovenste laag heen schijnt. Dit proces verloopt door het hele polymeer met een frequentie van 10^{15} keer per seconde per vierkante centimeter. Door de zijketens van de lichtgevende polymeren te veranderen, kun je oleds maken met verschillende kleuren licht. Het is nog lastig om zo blauw licht te maken (figuur 14.24). Dit licht heeft de meeste energie en de elektronen beschadigen het polymeer daardoor sneller als ze licht uitstralen.

In oledschermen worden geleidende polymeren gebruikt, maar polymeren zijn meestal moleculaire stoffen en dus slechte geleiders van stroom. De slechte geleiding komt doordat

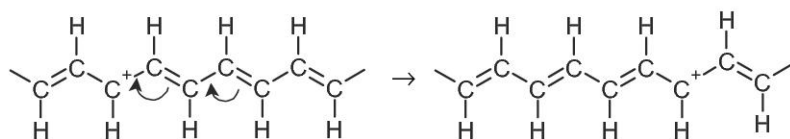
de elektronen vastzitten in de covalente bindingen tussen de atomen. In een aantal polymeren is geleiding wel mogelijk, zoals bijvoorbeeld in polyethyn.



14.25 Zonnecellen van geleidende polymeren

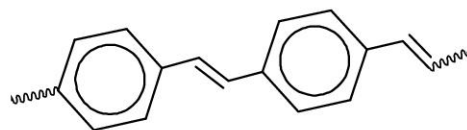


De geleiding verbetert sterk als je het polymeer laat reageren met een kleine hoeveelheid van een oxidator, zoals jood. Dan wordt een elektron uit het polymeer verwijderd, waarbij een positieve lading op de plaats van het elektron overblijft.

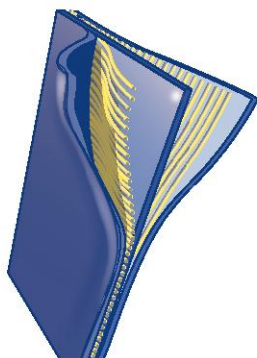


De dubbele bindingen kunnen dan gemakkelijk 'omklappen' waarbij de elektronen zich door het polymeer verplaatsen. De geleidbaarheid is dan even goed als die van metalen. In plaats van ethyn kun je ook andere alkynen als monomeer gebruiken. Er ontstaat dan een ander **geleidend polymeer**.

In oleds wordt bijvoorbeeld ook het polymeer van figuur 14.26 gebruikt.



14.26



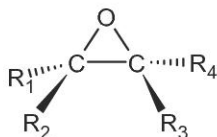
14.27 Een model van glare, de blauwe lagen zijn aluminiumlaagjes en de gele lagen zijn de epoxidematten.

Glare

Een materiaal waarin meerdere stoffen elkaar regelmatig afwisselen noemt je een **composiet**. De meeste composieten bestaan uit vezels in een kunststof. Glare (GLAss REinforced aluminium) is hierop een uitzondering. Het is een mengsel van een metaal en een polymeer. Glare bestaat uit laagjes aluminium van 0,3 tot 0,4 mm, vastgelijmd aan matjes van glasvezels in epoxyhars. De matjes met glasvezels liggen om en om tussen de aluminiumlagen in, zie figuur 14.27.

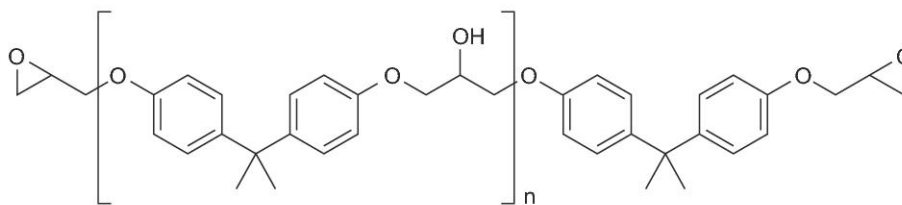
Dit materiaal is ontwikkeld op de Technische Universiteit in Delft. Glare is lichter dan aluminium en sterker dan staal. Een andere belangrijke eigenschap is dat het weerstand tegen beschadiging biedt. De glasvezel-epoxylagen voorkomen dat een optredend scheurtje groter wordt.

Deze eigenschappen maken glare zeer geschikt voor vliegtuigen. De Airbus A380, het grootste passagiersvliegtuig ter wereld, bestaat voor een groot deel uit glare.



14.28 Algemene formule van een epoxide

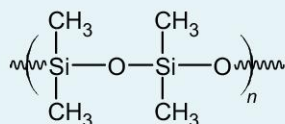
Epoxyhars is de verzamelnaam voor polymeren die een epoxide als monomeer hebben, zie figuur 14.28. Ze worden ook gebruikt in lijmen, coatings en als vloerbedekking. De structuurformule in figuur 14.29 boven aan de volgende bladzijde is een voorbeeld van een epoxyhars.



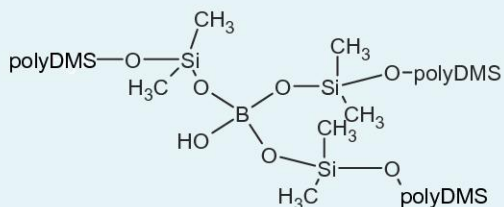
14.29 Een epoxyhars

Slimme Silly putty

Silly Putty is gelvormig speelgoed. Het heeft enkele opmerkelijke eigenschappen: het stuiter op de grond, het breekt wanneer je er hard op slaat en je kunt Silly Putty in verschillende vormen kneden. De eigenschappen van Silly Putty gaan voorgoed verloren wanneer het in aanraking komt met alcohol. Indien je Silly Putty opwarmt, bijvoorbeeld in een magnetron, wordt het zo hard als steen, maar na afkoeling wordt het even soepel als voorheen. Silly Putty is een siliconen polymeer. Het belangrijkste bestanddeel is polydimethylsiloxaan (PDMS):



Als de PDMS-ketens lang zijn, dan raken ze door veel vanderwaalsbindingen in elkaar gedraaid zoals een bord spaghetti. De Silly Putty is daardoor elastisch. Maar de bijzondere eigenschappen ontstaan door het toevoegen van boorzuur (H_3BO_3). Er ontstaat dan een netwerkpolymeer:



De uiteinden van PDMS ketens zijn ---Si---OH -groepen. Het boorzuur vormt via condensatiereacties crosslink tussen vrije OH-groepen van PDMS-ketens en boorzuur. De crosslinks zijn niet permanent. Als je zacht op de Silly Putty drukt, zorgt de langzame vervorming ervoor dat er crosslinks verbreken en dat er op andere plekken tussen de polymeerketens weer crosslinks worden gevormd, waardoor het materiaal een stroperige bijna vloeibare massa is. Als je er meer kracht op uitoefent, dan blijven de crosslinks intact waardoor het materiaal elastisch is en het zelfs kan breken.



14.30 Silly Putty lijkt een vaste stof, maar is een langzaam bewegende vloeistof met een hoge viscositeit.

● Experiment 14.2

Samenvatting

- Sommige polymeren kunnen zichzelf herstellen door het vormen van nieuwe bindingen: waterstofbruggen, ionbindingen of atoombindingen.
- Polymeren met een afwisseling van enkele en dubbele bindingen geleiden de stroom enigszins. Door elektronen uit het polymeer weg te halen verbetert de geleiding sterk.
- Sommige polymeren kunnen lichtgeven op plaatsen waar positieve gaten en negatieve elektronen samenkomen.
- Composieten zijn samengestelde materialen en kunnen bestaan uit afwisselende laagjes metalen, polymeren en/of andere vezels.

Opdrachten

A 12

Welke eigenschap op microniveau zorgt ervoor dat sommige polymeren geleidend zijn?

B 13

a Leg uit welk type reactie plaatsvindt bij stap 1 van de vorming van het zelfherstellende rubber op bladzijde 231.

In stap 1 kunnen ook moleculen ontstaan waarbij meer dan één zuurmolecuul met het diamine heeft gereageerd.

b Teken de structuurformules van alle mogelijke moleculen die kunnen ontstaan op dezelfde manier als het reactieproduct van stap 1.

c Leg uit welk type reactie plaatsvindt bij stap 2 van de vorming van het zelfherstellende rubber.

Na stap 2 is de stof nog vloeibaar. Dit komt doordat verschillende polymeerketens alleen door waterstofbruggen bij elkaar worden gehouden.

d Leg uit waardoor dit zorgt dat stof bij kamertemperatuur vloeibaar is.

e Leg aan de hand van de tekst uit waardoor de stof bij stap 3 vast wordt bij verwarming.

f Leg aan de hand van de structuur in figuur 14.21b uit hoe dit rubber zich weer herstelt na een breuk.

B 14

Glare heeft een dichtheid van $2,5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$.

a Bepaal met behulp van Binas hoeveel procent lichter glare is dan zuiver aluminium.

b Welke gunstige eigenschap van metalen wordt in glare gebruikt?

De glasvezel-epoxymatjes in glare liggen om en om. Daar wordt niet alleen mee bedoeld dat er steeds een laag aluminium tussen zit, maar ook dat de ene glasvezel-epoxy laag 90° gedraaid ligt ten opzichte van de volgende glasvezel-epoxy laag, zie figuur 14.27.

c Leg uit waarom dit zo wordt gedaan.

De epoxyhars waarvan een molecuul staat afgebeeld in figuur 14.29 wordt ook wel een polyether genoemd.

d Leg op basis van de structuurformule uit hoe men aan die naam komt.

e Leg op basis van de tekst en de structuurformule uit of het afgebeelde polymeer een copolymeer is.

B 15

Bij de polymerisatie van but-2-yn ontstaat een polymeer dat stroom kan geleiden.

a Teken een stukje uit het midden van een molecuul polybut-2-yn dat is opgebouwd uit vijf monomeereenheden.

Door dit polymeer te laten reageren met een klein beetje natrium krijgt het polymeer een elektron erbij en verbetert de geleidbaarheid sterk.

b Leg met behulp van de structuurformule uit hoe het elektron gemakkelijk van de ene naar de andere kant van het polymeer kan bewegen.

In figuur 14.26 zie je een geleidend polymeer, genaamd ppv. Dit wordt gebruikt in oledtelevisies.

c Neem de structuurformule over en geef de elektronen aan die voor de geleiding zorgen.

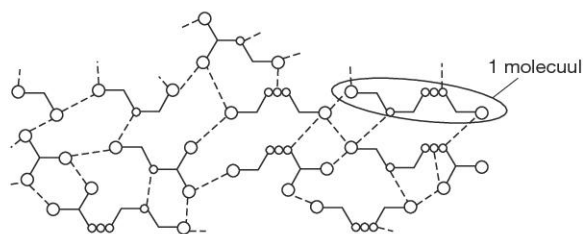
d Geef de structuurformule en de systematische naam van het monomeer waaruit ppv wordt gemaakt.

e Leg uit of dit polymeer goed of slecht biologisch afbreekbaar zal zijn.

f Leg uit of dit polymeer gevoelig is voor uv-straling.

C 16 Zelfherstellend elastiek

Een groep onderzoekers heeft een elastisch materiaal ontwikkeld met zelfherstellende eigenschappen. Als een elastiekje van dit materiaal wordt doorgesneden, hechten de twee delen bij samendrukken weer aan elkaar. Na afloop is het elastiekje weer net zo sterk en elastisch. Het materiaal bestaat uit allerlei verschillende moleculen, die elk zijn opgebouwd uit een aantal dezelfde basiseenheden. In figuur 14.31 is de mesostructuur van dit materiaal weergegeven.

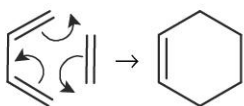


14.31

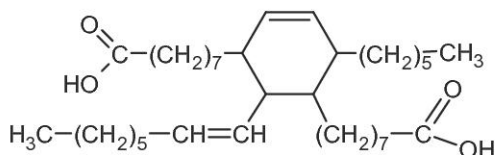
De stippellijnen geven waterstofbruggen tussen de verschillende moleculen weer. Door de vele waterstofbruggen vormen de moleculen een stevige netwerkstructuur, waardoor het materiaal elastische eigenschappen krijgt.

De vorming van het materiaal kan in drie stappen worden weergegeven.

Stap 1: Door een additiereactie van twee moleculen van een meervoudig onverzadigd vetzuur wordt een dizuur gevormd. Het mechanisme van deze additiereactie is hieronder vereenvoudigd weergegeven.

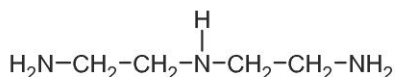


De structuurformule van het dizuur dat volgens deze additiereactie is gevormd, is hieronder weergegeven.



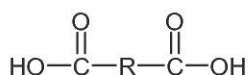
- a** Geef de structuurformule van het vetzuur dat als grondstof voor het dizuur is gebruikt. Je hoeft bij de beantwoording geen rekening te houden met eventuele stereo-isomerie.

Stap 2: Men laat het dizuur reageren met diëthyleentriamine (DET) om aan het gevormde dizuur waterstofbrugvormende groepen aan te brengen. De structuurformule van DET is hieronder weergegeven.



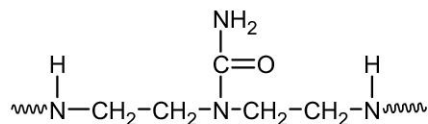
Afhankelijk van de gekozen molverhouding tussen het dizuur en DET worden verschillende producten gevormd. Dit gebeurt door middel van een condensatiereactie waarbij water wordt afgesplitst en amide-bindingen worden gevormd.

- b** Geef de vergelijking van de reactie wanneer twee moleculen DET reageren met één molecuul van het dizuur. Gebruik structuurformules en geef het dizuur schematisch weer zoals hieronder.



Stap 3: Om nog meer waterstofbrugvormende groepen aan te brengen laat men de in stap 2 gevormde producten reageren met ureum.

Atoomgroepen van de eenheden DET vormen atoombindingen met ureummoleculen, waarbij onder andere atoomgroepen worden gevormd zoals hieronder is weergegeven.



In deze reactie wordt nog een andere stof gevormd.

- c** Geef de naam van de andere stof die wordt gevormd als ureum met een eenheid DET reageert. Gebruik Binas tabel 67J.

Als een stukje van dit materiaal wordt doorgesneden, worden de waterstofbruggen tussen de moleculen aan weerszijden van de snede verbroken. Door de beide zijden tegen elkaar te drukken, komen de waterstofbrugvormende groepen weer met elkaar in contact en worden weer waterstofbruggen gevormd. De mate waarin het materiaal eenvoudig kan worden hersteld, hangt onder andere sterk af van de temperatuur. Bij 23 °C kan nog volledig herstel worden verkregen tot een week na de breuk, bij 40 °C tot 48 uur en bij 90 °C tot vijftien minuten.

- d** Geef een verklaring op microniveau waarom de tijd waarin het rubber nog kan worden hersteld, afneemt bij hogere temperatuur.

De toepassing van dit materiaal is beperkt tot droge omstandigheden. Als het materiaal onder vochtige omstandigheden beschadigd raakt, is het niet meer mogelijk een breuk te herstellen.

- e** Leg uit op microniveau waarom het zelfherstellend vermogen verdwijnt bij vochtige omstandigheden.
f Leg met behulp van begrippen op microniveau uit of het rubber uit deze opgave na herstellen sterker of minder sterk zal zijn dan die uit de tekst op bladzijde 231.

Naar: CE vwo 2016-II

Experiment

14.2 Silly Putty

Je ervaart de bijzondere eigenschappen van dit polymeer.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen hoe je macro-eigenschappen van bepaalde polymeren zoals zelfherstellend vermogen kunt verklaren met het micro- en/of het mesoniveau;
- uitleggen wanneer een polymeer geleidend is;
- je chemische kennis en vaardigheden toepassen in de context van slimme polymeren.

Tanden en chemie

De komst van fluoride heeft ervoor gezorgd dat in de westerse wereld een slecht gebit zoals hier op de foto vrijwel niet meer voorkomt. Maar ook verbeterde technieken en vulmaterialen dragen bij aan een mooier gebit. Zo gebruikt een tandarts nu polymeren gemengd met keramische materialen om mooie witte vullingen te maken.



Je leert

- vanuit de context tanden en kiezen wat keramische materialen zijn;
- de structuur en eigenschappen van keramische materialen;
- de structuur en eigenschappen van composieten met keramische materialen.

14.3 Keramische materialen

Materialen in je mond

Tandbeen is een composiet en bestaat uit een netwerk van polymeren, waarop zich kristallen van calciumhydroxyapatiet ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) afzetten. Tandglazuur dat de buitenkant van de tanden vormt is veel harder dan tandbeen doordat het glazuur vrijwel geheel uit hydroxyapatietkristallen bestaat. Het tandglazuur is een zout en bestaat dus uit ionen. Het staat in voortdurend contact met speeksel en wisselt daarmee ionen uit. Speeksel zorgt er zo voor dat het gebit in goede conditie blijft, maar het speeksel op je gebit is ook een goede voedingsbodem voor bacteriën.

Net als in je darmen zitten er namelijk ook talloze bacteriën in je mond. De bacteriën in je mond vormen een levend filmlaagje over je tanden, kiezen, tandvles, gehemelte en tong. Er zijn ruim zevenhonderd verschillende bacteriestammen in de mond gevonden. De bacteriën vormen met de voedselresten tussen je tanden tandplak en het zijn de bacteriën in de tandplak die suikers in de voedselresten omzetten in bijvoorbeeld melkzuur en azijnzuur. Deze zuren tasten het glazuur aan en veroorzaken uiteindelijk gaatjes in tanden en kiezen.

Om de gaatjes te repareren zijn er allerlei vulmaterialen. Al honderdvijftig jaar worden tanden en kiezen gevuld met zilveramalgaam (figuur 14.33). Dit is een legering van een metaalpoeder dat uit tin, zilver en koper bestaat en door de tandarts wordt gemengd met vloeibaar kwik. Het zachte mengsel hardt snel uit in een gaatje. De legering amalgaam heeft stofeigenschappen (macroniveau) die het zeer geschikt als vulmateriaal maken. Het is slijtvast, hard, bestand tegen vocht en warmte en heeft een lage uitzettingscoëfficiënt. Er zijn echter ook nadelen zoals de grijze kleur, maar het belangrijkste nadeel is dat zilveramalgaam 50% kwik bevat. Bij het maken van de vulling zijn de kwikdampen giftig voor de tandarts.



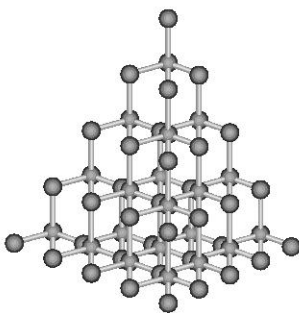
14.32 Tanden trekken in de middeleeuwen



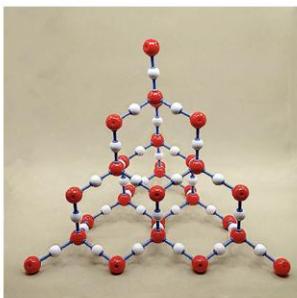
14.33 Grijs amalgaamvulling



14.34 Op een tentoonstelling in de Hermitage in Amsterdam was deze tsarenkroon te zien, bezet met 11 000 diamanten.



14.35 Model van het atoomrooster van diamant

14.37 Model van het atoomrooster van SiO_2 (Si is rood)

De laatste vijftien jaar zijn er nieuwe tandkleurige vulmaterialen ontwikkeld, die bestaan uit kunststoffen gemengd met keramische materialen. Dit samengesteld materiaal is net als glaze uit paragraaf 14.2 een **composiet**. Om een idee te krijgen van de mogelijkheden van dit soort composieten moet je eerst iets weten over keramische materialen.

Keramische materialen

Zand, glas, porselein, maar ook diamant zijn keramische materialen. Dit zijn vaste stoffen die meestal harder zijn dan polymeren en metalen en ook beter bestand zijn tegen zeer hoge temperaturen. Keramische materialen reageren niet of nauwelijks met andere stoffen en worden daarom ook steeds vaker als implantaat gebruikt, bijvoorbeeld bij het vervangen van ontbrekende tanden of voor het vervangen van een versleten heup.

Een groot nadeel van keramische materialen is dat ze moeilijk zijn te verwerken. Veel keramische materialen kun je door hun hoge smeltpunt alleen bij zeer hoge temperaturen smelten en verwerken. Een ander nadeel is de brosheid van keramische materialen. Hierdoor ontstaan bij een kleine vervorming al scheuren en breuken, denk maar aan een dure porseleinen vaas, die je per ongeluk omstoot.

Diamant is een keramisch materiaal (figuur 14.34). Diamanten zijn moeilijk te verwerken en zijn zo hard dat ze vrijwel alleen kunnen worden geslepen door andere diamanten. Eigenschappen als **hardheid** en **brosheid** van keramische materialen zijn te verklaren vanuit de kristalstructuur. Er zijn keramische materialen met een atoomrooster en er zijn er met een ionrooster.

Keramische materialen met een atoomrooster

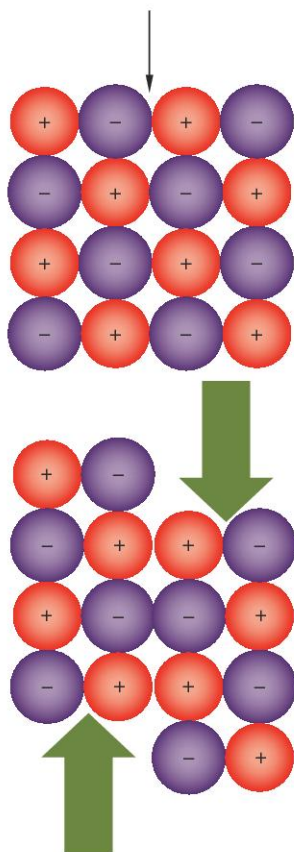
Het keramisch materiaal diamant bestaat uit koolstofatomen die via covalente bindingen zijn verbonden in een driedimensionaal netwerk, zie figuur 14.35. Dit is een **atoomrooster**. Het atoomrooster zorgt ervoor dat diamant zo hard is. Om diamant te vervormen, moet je een groot aantal van deze sterke covalente bindingen tegelijk verbreken. Als je diamant splijt, breekt direct een heel stuk van de diamant af, want de verbroken covalente bindingen worden niet opnieuw gevormd. Ondanks zijn hardheid is diamant toch bros.

Siliciumcarbide (SiC) is ook een keramisch materiaal en kan een goed alternatief voor dure diamanten zijn. Deze stof heeft net als diamant een atoomrooster, maar de helft van de koolstofatomen is vervangen door siliciumatomen. Silicium kan, net als koolstof, vier covalente bindingen vormen zodat elk siliciumatoom in siliciumcarbide is omringd door vier koolstofatomen en andersom. Dit zeer harde materiaal wordt onder meer verwerkt in slijpschijven en in de remschijven van sportwagens.

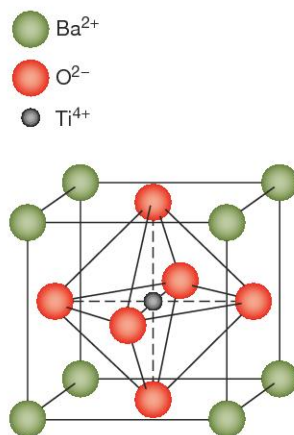
De meest voorkomende stof met een atoomrooster is siliciumdioxide. Dit zit onder meer in kwarts, graniet en in zand (figuur 14.36). Siliciumatomen en zuurstofatomen zitten om en om in een driedimensionaal netwerk (figuur 14.37). Het siliciumdioxide maakt onderdeel uit van het keramisch materiaal dat in moderne witte tandvullingen wordt gebruikt.



14.36 Zand is in enorme hoeveelheden nodig voor bouwactiviteiten onder andere in de composiet gewapend beton.



14.38 In het ionrooster ontstaat een breuk door verschuiven.



14.39 Het kristalrooster van BaTiO₃

Keramische materialen met een ionrooster

Zouten vormen de grootste groep keramische materialen, zoals het glazuur van je tanden. Het kristalrooster van zouten is een **ionrooster**. De ionen hebben een sterke onderlinge aantrekkingskracht, de ionbinding, waardoor je keukenzout bijvoorbeeld tot meer dan 800 °C moet verhitten voor het vloeibaar wordt.

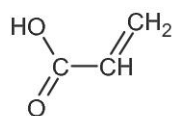
De bouw van het ionrooster verklaart waarom zouten barsten als er te veel kracht op wordt uitgeoefend, terwijl metalen juist meebuigen. Wanneer je twee lagen ionen langs elkaar probeert te schuiven, moet de ionbinding tussen een groot aantal ionen tegelijk worden verbroken, een zout kan daardoor vrij grote krachten weerstaan. Maar als de laag een beetje is verschoven, zitten juist ionen tegenover elkaar die dezelfde lading hebben en elkaar afstoten. Daar ontstaat in het zoutkristal een breuk, zie figuur 14.38.

Omdat er zeer veel keramische materialen met een ionrooster zijn, is er een verdeling gemaakt tussen traditionele keramiek met klei als grondstof en technische keramiek die wordt ontwikkeld met speciale eigenschappen. Een voorbeeld van technische keramiek is bariumtitaanaat (BaTiO₃). Dit materiaal kan in vijf verschillende kristalstructuren voorkomen, afhankelijk van de temperatuur. Een van deze structuren is afgebeeld in figuur 14.39. Het grijze Ti⁴⁺-ion heeft een vrij grote beweeglijkheid in deze structuur. Deze beweeglijkheid zorgt ervoor dat in de kristallen veel elektrische energie kan worden opgeslagen. Daar wordt gebruik van gemaakt in je smartphone waar honderden heel kleine condensatoren van bariumtitaanaat in zitten.

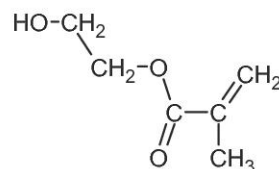
Composieten

In het begin van de paragraaf is al genoemd dat voor het vullen van gaatjes in je gebit composieten worden gebruikt. In de vorige paragraaf zag je al composieten van een polymeer met een metaal. Voor de vulling in je gebit bestaat de composiet uit een polymeer gemengd met 30 tot 80% fijngemalen keramisch materiaal. Dit kunnen deeltjes kwarts, glas of een zout zijn. De afmetingen van de deeltjes ligt tussen de 0,02 en 0,04 µm.

Het polymeer is polyacrylzuur, waaraan ook het monomeer hydroxyethylmetacrylaat (HEMA) is toegevoegd. De onderstaande structuurformules a en b geven de monomeren van de polymeren weer.



a Propeenzuur, de monomeer van polyacrylzuur

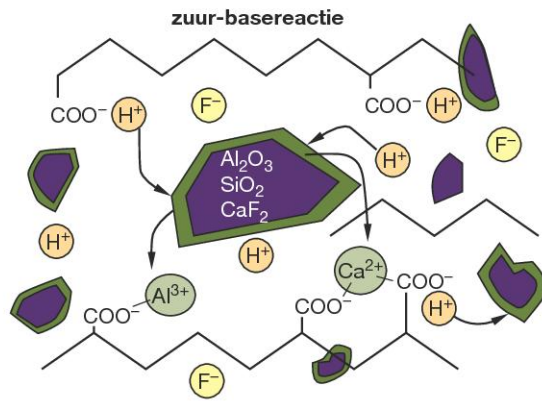


b HEMA

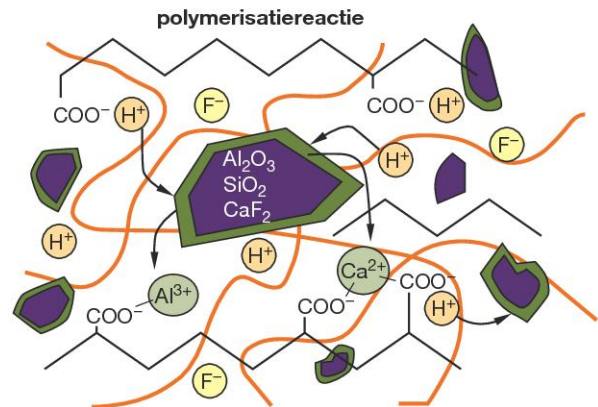
In de keramische deeltjes zitten deeltjes met een ionrooster, Al₂O₃ en CaF₂, en SiO₂ met een atoomrooster.

In het polymeer waarin de keramische deeltjes zich bevinden, verloopt een zuur-basereactie en onder invloed van licht een polymerisatiereactie. Er wordt een netwerk gevormd waarin de keramische deeltjes vastzitten. In figuur 14.40 op de volgende bladzijde zie je de twee reacties die verlopen apart in een model weergegeven. Links staat de zuur-basereactie en rechts de polymerisatiereactie van het HEMA die voor het netwerk zorgt. Deze composieten worden ook glasionomeren genoemd en zijn zeer hard en slijtvast.

GLASIONOMEREN



H⁺-ionen dringen glasdeeltjes binnen waardoor Ca²⁺- en Al³⁺-ionen vrijkomen en de acrylketens crosslinks vormen. Rond de glasdeeltjes ontstaat een laagje silicahydrogel. Ook komen er fluoride-ionen (F⁻) vrij.



Naast de zuur-basereactie treedt tevens een polymerisatie op van hydroxyethylmetacrylaat (HEMA). Deze polymerisatie kan door licht of door een toegevoegde katalysator worden gestart

14.40 Om je een idee te geven, zie je hier een modelvoorstelling van de reacties die verlopen bij het maken van witte vullingen.



14.41 Stalen schroefheipaal met wapeningen, die moet worden afgevuld met beton

Naast de hierboven beschreven composieten zijn er nog andere soorten composieten. Zo is gewapend beton een composiet van metaal en keramisch materiaal. Beton zonder wapening is heel hard, je kunt het moeilijk vervormen, maar het kan wel gemakkelijk scheuren. Staal is sterk, maar ook buigzaam, het kan hierdoor grote krachten weerstaan. Door stalen staven bij het storten in beton te plaatsen, ontstaat een materiaal dat hard is en grote krachten kan weerstaan, zie figuur 14.41.

Je botten zijn een voorbeeld van een natuurlijke composiet. Ze moeten hard zijn om het skelet overeind te houden, maar ook een beetje meegeven, anders breken ze te gemakkelijk. De composiet van botten is samengesteld uit het keramisch materiaal hydroxyapatiet, dat je ook al zag bij het tandglazuur, en een natuurlijk polymeer, collageen. Het hydroxyapatiet zorgt voor de hardheid en het polymeer zorgt voor de nodige buigzaamheid.

Twee andere soorten composiet die vaak worden gebruikt zijn vezelversterkte composieten en composieten in laagjes.

Vezelversterkte composieten

De composieten voor je gebit zijn voornamelijk samengesteld uit keramisch materialen met een ionrooster en een atoomrooster. Bij vezelversterkte composieten wordt keramisch materiaal met een atoomrooster gebruikt, samen met polymeren. De vezels zijn bijvoorbeeld lange zeer dunne glasvezels (SiO₂) of koolstofvezels (C).

De dunne glasvezels worden gebruikt om een polymeer te versterken, meestal een thermoharder. Dat levert een materiaal waarbij het polymeer zorgt voor de juiste vorm en de glasvezel voor de extra sterkte. Deze composiet wordt gebruikt voor snowboards, surfplanken en de bladen van windmolens.

Carbon is een vezelversterkte composiet die zijn sterkte dankt aan dunne koolstofvezels die aan de polymeer zijn toegevoegd. Koolstofvezels zijn erg licht, maar toch sterker dan staal en rekken minder uit dan polymeren. Koolstofvezels bestaan vrijwel geheel uit koolstofatomen. Carbon wordt toegepast in vliegtuigen, racefietsen en tablets.



14.42 Een gebroken autoruit wordt bij elkaar gehouden door de polymeer in het composiet.

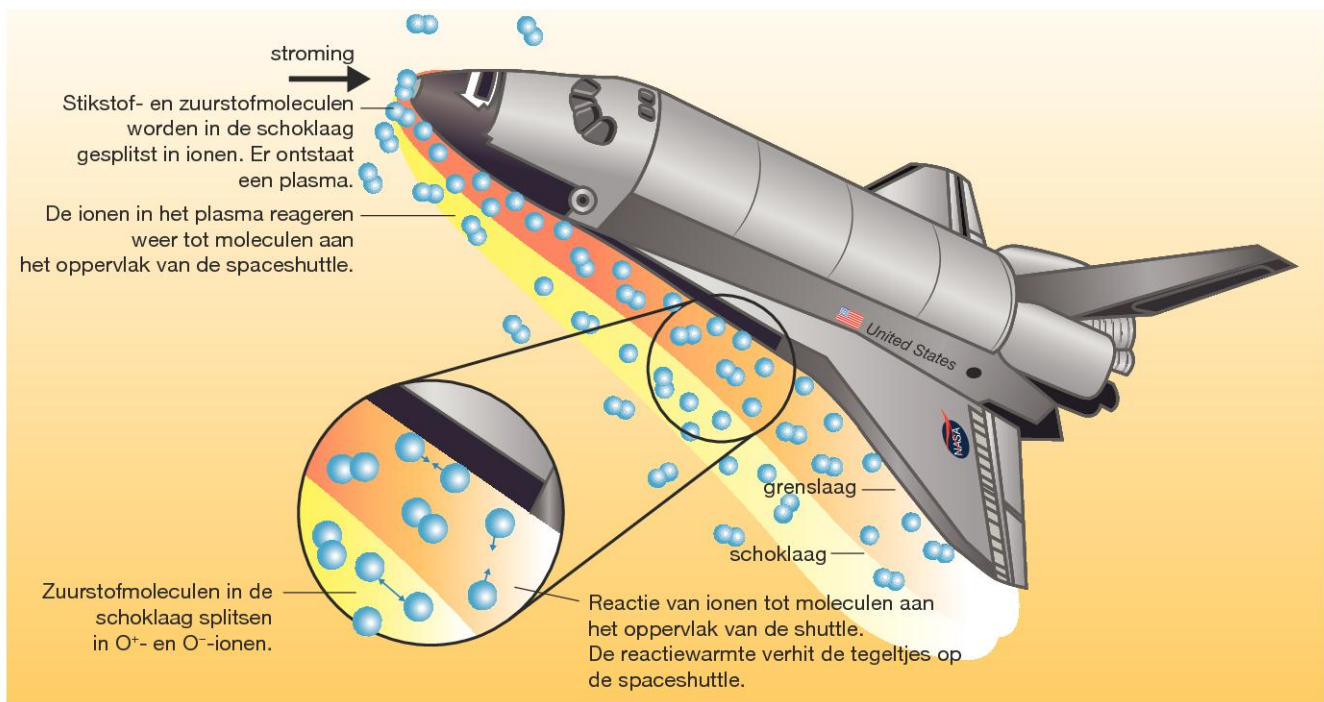
Composieten in laagjes

Composieten die zijn samengesteld uit keramisch materiaal met een atoomrooster en polymeren kunnen ook in laagjes worden verwerkt. Een voorbeeld is gelaagd glas, waarin twee of meer lagen glas bij elkaar worden gehouden door een laag polymeer. Dit is sterker en veiliger dan één laag glas van dezelfde dikte. Als gelaagd glas beschadigd raakt, breekt niet de hele ruit, maar houdt het polymeer het gebroken glas bij elkaar (figuur 14.42).

Daarom wordt gelaagd glas toegepast in autoruiten, in inbraakwerend glas en zelfs in kogelwerend glas.

Composieten hebben niet alleen voordelen. Composieten zijn vaak duurder dan andere materialen en het maken en verwerken van het materiaal kan erg lastig zijn. Een glaszetter bijvoorbeeld kan gelaagd glas niet zomaar op maat snijden en een kleine beschadiging in een metaal kan vaak 'uitgedrukt' worden, terwijl een beschadigde composiet meestal geheel moet worden vervangen.

In figuur 14.43 zie je nog een voorbeeld waarin technische keramiek en composieten zijn toegepast. De Amerikaanse spaceshuttles waren voorzien van lichte, zeer hittebestendige keramische tegels, die de enorm hoge temperaturen bij terugkeer in de dampkring moesten weerstaan. De neuskegel van de spaceshuttles en de voorkant van de vleugels waren tegels van een gelaagde composiet van koolstofvezels en een hars die speciaal werd bewerkt en daarna voorzien van een siliciumcarbide coating om bestand te zijn tegen aantasting door de hoge temperaturen.



14.43 De temperaturen waarmee de spaceshuttle bij het terugkeren naar de aarde te maken kreeg liepen rond de neus en de voorkant van de vleugels op tot 1600 °C. Naar achteren toe aan de onderzijde werd de temperatuur rond de 1000 °C. Om deze temperaturen te weerstaan was de spaceshuttle geheel bedekt met ongeveer 24 000 tegeltjes van keramisch materiaal die waren gelijmd op de aluminium buitenkant van de shuttle.

Samenvatting

- Keramische materialen zijn harde vaste stoffen met een hoog smeltpunt. Ze zijn vaak bros en reageren niet of nauwelijks met andere stoffen.
- Keramische materialen hebben een atoomrooster of een ionrooster. In een atoomrooster zijn atomen door een covalente binding verbonden in een netwerk. In een zout zorgt de ionbinding ervoor dat de ionen in het ionrooster vastzitten. De bouw van het atoom- en ionrooster zorgt voor de macroscopische eigenschappen van de keramische materialen.
- Composieten kunnen samengestelde materialen zijn van polymeren en keramische materialen. Vaak zijn de stoffen op mesoniveau gemengd, bijvoorbeeld korrels of vezels van technische keramiek, die in polymeer materiaal liggen.

Opdrachten

A 17

- Noem vier eigenschappen van keramische materialen.
- Welke twee typen kristalroosters komen op mesoniveau bij keramische materialen voor?
- Wat zijn op microniveau de bouwstenen van elk van deze twee typen kristalroosters?

B 18

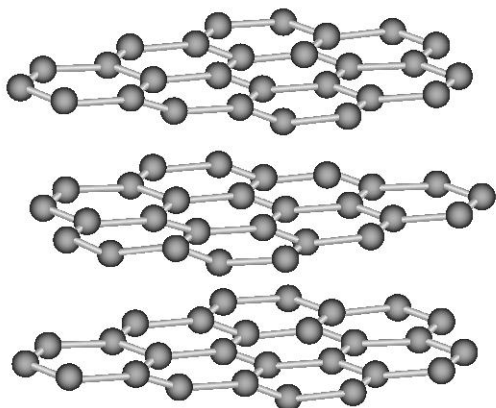
Vergelijk de volgende keramische materialen met elkaar: siliciumcarbide (SiC) en wolfram(IV)carbide (WC). Beide stoffen horen tot de hardste materialen ter wereld.

- Wat voor soort rooster heeft siliciumcarbide?
- Leg uit welk soort binding op microniveau voor de hardheid van siliciumcarbide zorgt.
- Wat voor soort rooster heeft wolfram(IV)carbide?
- Welk soort binding zorgt op microniveau voor de hardheid van wolfram(IV)carbide?

B 19

Grafiet bestaat net als diamant uit koolstofatomen en is ook een keramisch materiaal. Grafiet is erg zacht voor een keramisch materiaal en geleidt de elektriciteit goed. In figuur 14.44 is een model van grafiet weergegeven.

- Geef een verklaring op mesoniveau voor het feit dat grafiet een zacht materiaal is.
- Geef een verklaring op microniveau voor de goede geleidbaarheid van grafiet.



14.44 Structuur van grafiet

B 20

Beton wordt gemaakt door cementpoeder, zand, grind en water in de juiste verhouding te mengen. Bij het uitharden vormen het cementpoeder en het water een netwerk van zouthydraten waarin zandkorrels en grindkorrels gevangen zitten.

Beton is vrij hard, maar ook redelijk bros. Bij een verkeerde belasting ontstaan er vrij gemakkelijk scheuren in beton. Bij sterke verhitting, bijvoorbeeld een felle brand, verliest beton veel sterkte. Beantwoord met behulp van begrippen op microniveau de volgende vragen.

- Leg uit welk type binding verantwoordelijk is voor de hardheid van beton.
- Leg uit welk type binding zal bezwijken als een stuk beton verkeerd wordt belast.
- Wat gebeurt er met beton als het sterk wordt verhit?

B 21 Witte vullingen

Als je een gaatje hebt, plaatst de tandarts tegenwoordig meestal een witte vulling, die bestaat uit een polymeer met kleine stukjes kwarts of glas voor de hardheid. De korrelgrootte van deze keramische stoffen is van grote invloed op de eigenschappen.

Als je in plaats van grote korrels veel kleine korrels mengt met de polymeer betekent dit dat je een groter oppervlak aan korrels hebt. Er is relatief meer polymeer nodig om het te mengen. Deze vullingen zijn mooi te polijsten, kleurvast en slijten minder, maar hebben als nadeel dat de vulling makkelijker vervormt en na het plaatsen meer krimpt.

- Noem twee redenen waarom het krimpen van een vulling na plaatsing ongewenst is.
- Beredeneer waarom een vulling met kleinere korrels minder vormvast is en meer krimpt.

Sommige moderne vullingen bestaan uit zogenaamde glasionomeren. Hierin zijn korreltjes glasachtig materiaal gemengd met polypropeenzuur. Door een zuur-basereactie met deeltjes uit het glas krijgen de zuurgroepen een negatieve lading. Het polymeer wordt een ionomeer. Bij het bereiden van het gebruikte 'glas' is onder meer calciumfluoride toegevoegd. De positief geladen calciumionen zijn enigszins mobiel en bewegen bij het uitharden van de vulling naar de ionomeerketens en verbinden deze met elkaar.

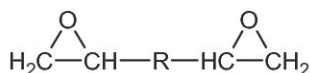
- Geef de structuurformule van een gedeelte van een molecuul polypropeenzuur dat uit drie monomeereenheden is opgebouwd en negatief is geladen.
- Geef in een tekening met twee polymeerketens uit vraag c aan op welke wijze de calciumionen crosslinks tussen de polymeerketens vormen.

Aan de glasionomeer is ook de monomeer HEMA toegevoegd, dat onder invloed van licht polymeriseert.

- e Zoek in de tekst van de paragraaf de structuurformule van HEMA en teken de structuurformule van een deel van de polymeer die ontstaat. Geef drie monomeereenheden.

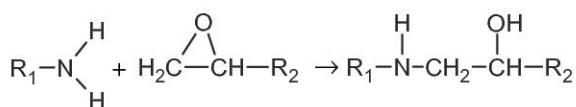
C 22 Carbon

Carbon is een composiet die is samengesteld uit een netwerkpolymeer en koolstofvezels. Het netwerkpolymeer in carbon is een epoxyhars. De epoxyhars wordt gevormd uit twee monomeren: een amine en een zogeheten di-epoxide. Een di-epoxide heeft de volgende structuur:

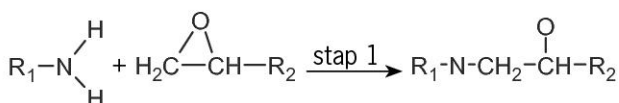


Moleculen van het di-epoxide bevatten aan beide uiteinden een epoxidegroep.

Wanneer het di-epoxide wordt gemengd met de amine treedt de hieronder weergegeven reactie op. Met R_1 en R_2 worden de overige delen van de moleculen aangeduid.



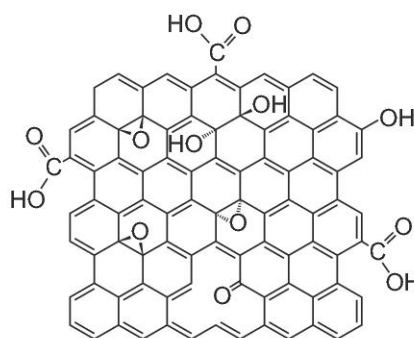
De amine treedt hierbij op als een nucleofiel deeltje. Hieronder is de reactie onvolledig weergegeven in twee stappen. In stap 2 verplaatst zich een H atoom.



- a Neem de beide reacties over en maak de zstappen af door ontbrekende elektronenparen en atomen aan te vullen. Gebruik lewisstructuren. Geef met pijlen aan hoe elektronenparen zich verplaatsen. Geef formele ladingen aan.

Om een voorwerp van carbon te produceren worden de twee monomeren samen met de koolstofvezels in een mal geperst. Voor de sterkte van het gevormde carbon is van belang dat de koolstofvezels goed aan de epoxyhars hechten.

Op microniveau bestaan de vezels uit meerdere koolstoflaagjes van elk één atoom dik, vergelijkbaar met grafiet (zie Binas tabel 67E). Dankzij de platte vorm liggen de lagen dicht op elkaar. Om de hechting met het netwerkpolymeer te verbeteren worden de koolstofvezels voorbehandeld met een oxidator. In figuur 14.45 is weergegeven hoe een laagje er dan uit kan zien.



14.45

- b Leg uit op microniveau waarom deze voorbehandeling van de koolstofvezels leidt tot een betere hechting tussen de koolstofvezels en de hierboven beschreven epoxyhars.

Door deze voorbehandeling blijkt de sterkte van de koolstofvezels zelf af te nemen. Men verklaart dit uit een afname van de onderlinge hechting van de koolstoflaagjes.

- c Geef een verklaring op microniveau waarom de onderlinge hechting van de koolstoflaagjes afneemt door de voorbehandeling.

Naar: CE vwo 2016-II

C 23 ★

Boornitride (BN) komt in verschillende kristalstructuren voor. Een van de kristalvormen is een kubische vorm en dit is een zeer hard keramisch materiaal met zowel atomaire als ionaire kenmerken. Door zijn hardheid wordt boornitride toegepast als slijp- en boormiddel.

De kristalstructuur van boornitride lijkt op diamant, waarin boor en stikstof ieder vier covalente bindingen vormen.

- a Teken de valentie-elektronen rondom een booratom en een stikstofatoom met elk vier covalente bindingen.
b Geef de (formele) lading van elk atoom en verklaar het ionaire karakter van boornitride.

Je kunt nu

- uitleggen wat keramische materialen zijn en het verschil aangeven tussen materialen met een atoomrooster en met een ionrooster;
- eigenschappen van keramische materialen toelichten;
- uitleggen wat een composiet is en op mesoniveau beschrijven hoe een composiet is samengesteld en de functie van de verschillende materialen aangeven.

Glazenwassen

Het wassen van ramen is niet altijd eenvoudig. Deze glazenwassers hangen aan klimtouwen bij het wassen van de ramen van een wolkenkrabber in Buenos Aires. Voor dit soort gebouwen is een water- en vuilafstotende coating ideaal. Een dergelijke coating moet extreem dun zijn, want het licht moet er gewoon doorheen kunnen.



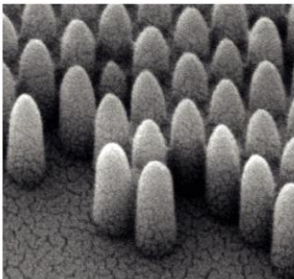
Je leert

- wat nanotechnologie is;
- vanuit contexten toepassingen van nanotechnologie kennen.

14.4 Nanotechnologie



14.46 Lotusbladeren met ronde waterdruppels



14.47 Hydrofobe coating, de afmeting van de puntjes is 5 tot 10 nm.

Nanocoating

Ramen voorzien van een hydrofobe coating is een goed alternatief voor het wassen van ramen in grote glazen wolkenkrabbers. Het principe van zo'n coating berust op het lotuseffect. Lotusbladeren blijken nooit nat te worden, hoe hard het ook regent. Waterdruppels rollen gewoon van de bladeren af, waarbij ze ook vuil en stof meenemen (figuur 14.46). Dit bijzondere effect ontstaat doordat de oppervlakte van de bladeren niet vlak is, maar is bedekt met kleine ongeveer 10 μm hoge kegeltjes met een wasachtige punt. De waterdruppels rollen over deze superhydrofobe puntjes.

Wetenschappers hebben uitgaande van het lotuseffect een coating ontwikkeld om glas water- en vuilafstotend te maken. Het glas wordt gecoat met een zeer dun laagje vanadiumdioxide met staafjes van ongeveer 5 tot 10 nm hoog (figuur 14.47). Deze groepering van deeltjes uit het microniveau geven een mesostructuur die superhydrofoob is. Waterdruppels rollen van het glas en het glas blijft nu schoon.

Het ontwikkelen van de coating valt onder **nanotechnologie**. Nanotechnologie is afgeleid van het Griekse woord nanos, dat dwerg betekent en houdt zich bezig met structuren op mesoniveau van ongeveer 10 tot 200 nm, hoewel deze grenzen niet heel scherp zijn. Om je een idee te geven van de afmeting van een nanometer, een menselijke haar is bijvoorbeeld 80 000 nanometer dik.

Het blijkt dat stoffen op nanoschaal soms bijzondere eigenschappen hebben. Zo zorgt de coating niet alleen voor schoon glas, maar hij zorgt ook voor minder warmteverlies in de winter en voorkomt dat infraroodstraling van de zon zomers het gebouw inkomt.

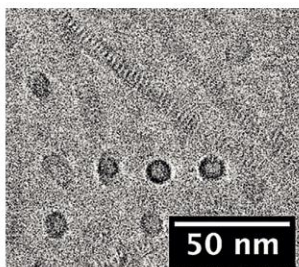
Nanostructuren maken

Wereldwijd wordt door wetenschappers geëxperimenteerd met het maken van nanostructuren. Met name nanobuisjes hebben een grote toekomst. Men verwacht dat nanobuisjes met een diameter van enkele nanometers ongelooflijk veel toepassingen kunnen hebben zoals van het afleveren van kankermedicijnen in een cel tot het ontzilten van zeewater.

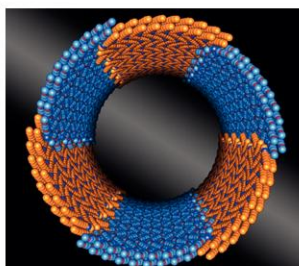
In de vorige paragraaf is bij composieten al gesproken over vezelversterkte composieten. De vezels kunnen koolstofvezels zijn, maar in nieuwe materialen zijn de koolstofvezels straks vervangen door koolstofnanobuisjes. Koolstofnanobuisjes zijn enorm sterk in de lengterichting en wegen weinig en zijn dus heel geschikt als versterking in composieten.



14.49 Bespuiten van nanobuisjes op een draaiende spoel met een polymeer



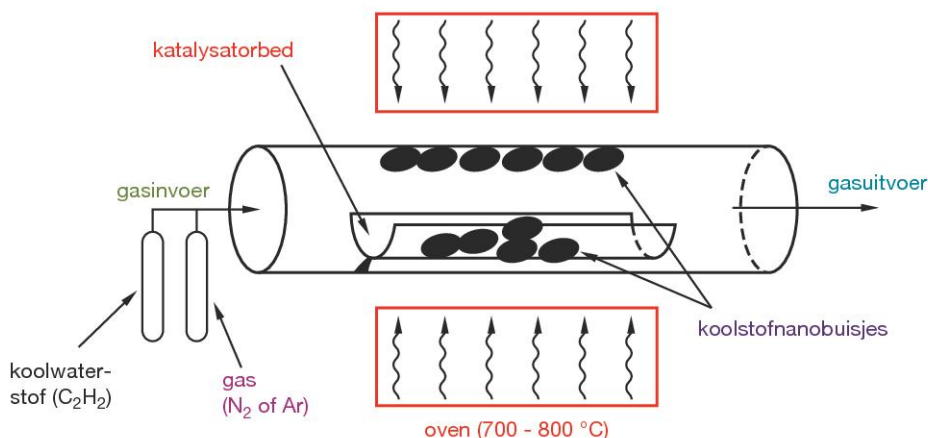
14.50 Beeld gemaakt met een cryo-elektronenmicroscopie van de vorming van de nanobuisjes. Let op de identieke diameter van de buisjes.



14.51 Een model van de zelfassemblage van nanobuisjes. De gekleurde blokken zijn de twee tegelvormige polymeren.

Productie van koolstofnanobuisjes

De productie van koolstofnanobuisjes verloopt meestal door gasvormige koolwaterstoffen zoals ethyn (C_2H_2) in contact te brengen met een katalysator van kobalt en ijzer op een laag siliciumdioxide (figuur 14.48). Aan het oppervlak van de katalysator ontstaan dan bundels van buisjes met doorsneden van 8-12 nm. De lengte varieert en kan enkele millimeters zijn, maar er is ook al eens een nanobuisje gemaakt van 0,5 m.



14.48 Schematische voorstelling van de productie van koolstofnanobuisjes

Voor de productie van een composiet met koolstofnanobuisjes moeten de buisjes eerst in een plat vlak naast elkaar worden gelegd. Het platte vlak van buisjes kan dan bijvoorbeeld op een draaiende spoel worden gebracht en worden bespoten met een polymeer. De polymeer houdt de buisjes bijeen en zo kunnen meerdere lagen voor de composiet worden gemaakt (figuur 14.49).

Zelfassemblage

Het is niet eenvoudig om nanostructuren te bouwen voor toepassing op grote schaal. Er zijn voor één composiet al snel miljarden nanobuisjes nodig en dan ook nog van dezelfde diameter en lengte. Daarom wordt veel onderzoek gedaan naar moleculen die zelf nanostructuren vormen, ook wel zelfassemblage genoemd.

Onderzoekers van het Amerikaanse Berkeley Lab hebben een polymeer ontwikkeld die in water gebracht spontaan holle buisjes vormt. Het polymeer bestaat uit twee verschillende polymeerblokken, maar van dezelfde afmeting en vorm. De blokken vormen een soort moleculaire tegeltjes die in water nanobuisjes vormen van dezelfde diameter en een lengte van 100 nm (figuur 14.50). Bij de vorming van de buisjes bleek ook dat hydrofiele blokken tegen elkaar zaten en hydrofobe blokken ook (figuur 14.51).

Het is duidelijk dat voor het opschalen van de productie van nanobuisjes nog veel onderzoek nodig is, de mogelijke toepassingen zijn echter talrijk.

Bloeiende structuren

De Nederlandse chemicus Wim Noorduin doet aan Harvard University onderzoek naar bijzondere kristalstructuren. Hij heeft met zijn bloementuinen de wereldpers gehaald. In een bekersglas met een verzadigde oplossing van bariumchloride en natriumsilicaat blijken heel bijzondere structuren te groeien. Koolstofdioxide die van nature in water aanwezig is start een reactie waarbij een neerslag van kristallen van bariumcarbonaat ontstaat. Als bijkomstigheid daalt de pH rond de kristallen en dat heeft als gevolg een reactie met het silicaation. Deze tweede reactie legt een laagje silica op de bariumcarbonaatkristallen. De pH rond de structuur stijgt weer waardoor de eerste reactie verloopt en er weer bariumcarbonaat ontstaat. Noorduin en zijn groep onderzoekers hebben kans gezien de omstandigheden in hun oplossingen zodanig te manipuleren dat er prachtige structuren ontstaan in de vorm van bloemen (figuur 14.52a en b). Ze varieerden de concentraties van de opgeloste zouten, de concentratie van CO_2 en de temperatuur.

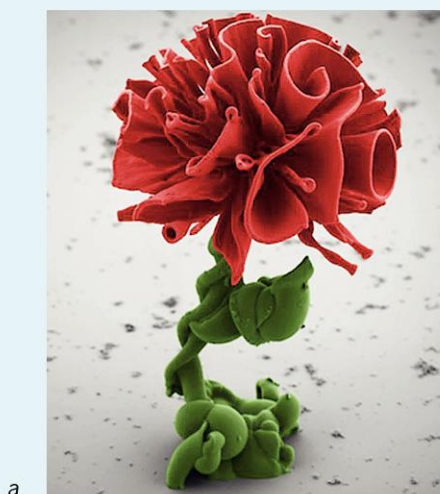
Door die variaties tijdens de groei van de structuren aan te brengen ontstaan er stelen met bladeren en bloemkelken. De structuren kunnen van nanoafmeting zijn, maar ook doorgroeien tot zo'n 5 μm .

Als je de structuren onder de elektronenmicroscopie ziet hebben ze allemaal grijstinten, maar Noorduin heeft ze voor de publicatie in het tijdschrift *Science* ingekleurd, waardoor ze er nog meer uitzien als bloemen.

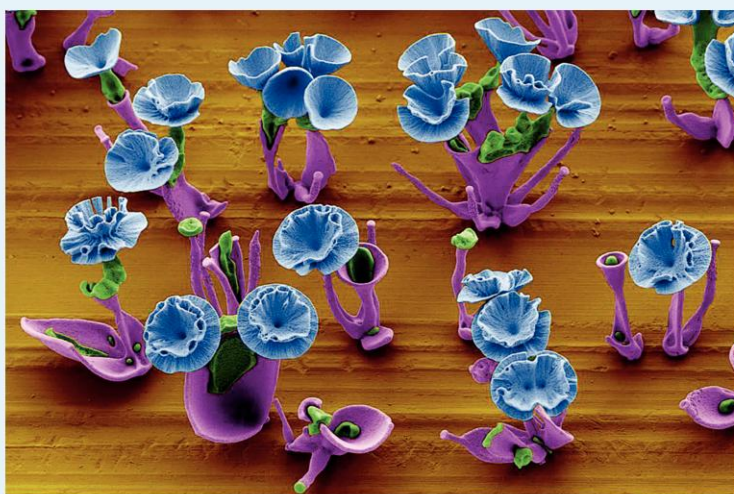
De techniek van Noorduin is al zo ver dat hij op de bloembladeren van zijn bloemen kleine ribbeltjes kan aanbrengen. Zo heeft hij een bloem gemaakt waarop met morsetekens het woord 'hello' staat.

De onderzoekers zijn nu begonnen om de groei van de structuren niet meer in bekersglazen te bestuderen, maar in microreactoren en er wordt ook gekeken naar mogelijke toepassingen voor de structuren. Zo zou een kristalbloemenveld mogelijk kunnen worden toegepast als katalysator bij chemische reacties.

Bron: *Science* en de *Volkskrant*



a



b

14.52 Ingekleurde structuren gemaakt door Wim Noorduin

● Opdracht C27

Samenvatting

- Nanotechnologie houdt zich bezig met structuren op mesoniveau van ongeveer 10 tot 200 nm. Stoffen krijgen soms andere eigenschappen als ze met nanotechnologie worden gemaakt.
- Composieten kunnen worden versterkt door daarin laagjes koolstofnanobuisjes aan te brengen afgewisseld met polymeerlagen.
- Zelfassemblage is een mogelijke manier voor de productie van nanobuisjes.

Opdrachten

A 24 

- a** Leg uit wat wordt verstaan onder nanotechnologie.
- b** Noem twee producten waarbij nanotechnologie is gebruikt.

Een nanometer is een miljardste meter. Druk de volgende afstanden uit in nanometer:

- c** een waterdruppel van $5 \cdot 10^{-3}$ meter
- d** een koolstofatoom van $154 \cdot 10^{-12}$ meter

B 25

Om het schoonhouden van ramen in hoge gebouwen te verbeteren kan een superhydrofobe stof worden aangebracht.

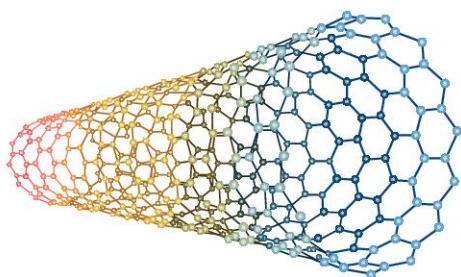
- a** Teken een structuur op mesoniveau van de stof en geef in de tekening aan hoe een waterdruppel ervan afrolt.

Amerikaanse onderzoekers hebben coatings van nanokegeltjes aangebracht op vezels en hiervan lapjes stof met vrij grote poriën gemaakt. Water trekt hier niet in, maar blijft erop liggen.

- b** Leg uit of deze stof ook waterdamp tegenhoudt.
- c** Bedenk een nuttige toepassing voor deze vezels.

B 26

Bekijk de structuur van het koolstofnanobuisje in figuur 14.53. De bolletjes op de hoekpunten stellen koolstofatomen voor.



14.53

- a** Wat voor soort binding is verantwoordelijk voor de enorme sterkte van deze buisjes?
- b** Geef een verklaring op microniveau voor de goede geleidbaarheid van dit materiaal.
- c** Teken gezien vanuit het mesoniveau een model van een composiet dat is opgebouwd uit een polymeer versterkt met koolstofnanobuisjes. Let er goed op dat dit materiaal in verschillende richtingen even sterk is.

Ook van titaniumdioxide (TiO_2) kunnen nanobuisjes worden gemaakt. Een van de productieprocessen maakt gebruik van

titanium(IV)butanolaat. Het titaan(IV)butanolaat, $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$, wordt gemaakt uit titaan(IV)chloride en butanol.

- d** Geef de reactievergelijking van deze reactie.

Het titanium(IV)butanolaat wordt nu op koolstofnanobuisjes gebracht en gedurende een aantal uren met lucht verwarmd tot 550°C , waarbij buisjes van alleen nog maar TiO_2 ontstaan.

- e** Bedenk welke reactie er tijdens dit proces moet verlopen om deze buisjes te kunnen vormen.

C 27

Lees de tekst in het kader 'Bloeiende structuren' en beantwoord de volgende vragen.

Het opgeloste koolstofdioxide in het water zorgt voor het ontstaan van kristallen bariumcarbonaat.

- a** Geef de reactievergelijking voor het ontstaan van bariumcarbonaat.
- b** Leg uit waardoor de pH rond het kristal daalt.

Als een groot deel van de carbonaationen heeft gereageerd, verloopt de vorming van bariumcarbonaat vrijwel niet meer. In de oplossing is ook opgelost natriumsilicaat, Na_2SiO_3 , aanwezig. Het silicaation is een sterke base.

- c** Geef de lewisstructuur voor het silicaation.
- d** Leg met een reactie uit hoe het laagje silica ontstaat. Gebruik als formule voor het silica $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
- e** Leg uit waarom de pH stijgt als het laagje silicagel wordt gevormd.
- f** Leg uit waarom de vorming van bariumcarbonaat weer start.

Een van de mogelijke toepassingen zou als katalysator kunnen zijn.

- g** Bedenk een reden waarom zo'n veld van bloemstructuren geschikt zou kunnen zijn als katalysator.

C 28

Boorcarbide, B_4C , is een zeer harde stof die onder andere wordt toegepast in kogelwerende vesten waarin platen van boorcarbide zijn verwerkt. De vesten zijn daardoor zwaar en verlenen weinig bewegingsvrijheid. Onderzoekers aan de universiteit van South Carolina hebben een methode ontwikkeld om katoenvezels met boorcarbide te versterken. Zo zou je van een gewoon katoenen T-shirt een shirt kunnen maken met kogelwerende eigenschappen, terwijl het toch licht en flexibel is.

Ze hebben een lapje katoen sterk verhit in aanwezigheid van diboortrioxide en nanodeeltjes nikkel als katalysator, terwijl continu argon over het materiaal werd geleid voor het afvoeren van de gasvormige producten die bij het proces ontstaan.

a Waarom zou men argon en geen lucht bij het proces hebben gebruikt?

Er vinden twee processen plaats. De katoenvezel die grotendeels uit cellulose bestaat ontleedt, waarbij een sterke koolstofvezel ontstaat. Het materiaal is zeer sterk, maar nog steeds behoorlijk flexibel doordat de koolstofvezel die bij de ontleding van de cellulose ontstaat dezelfde vezelstructuur heeft als de oorspronkelijke cellulose.

b Leg aan de hand van de bouw op mesoniveau uit waardoor een koolstofvezel sterker is dan de cellulosevezel.

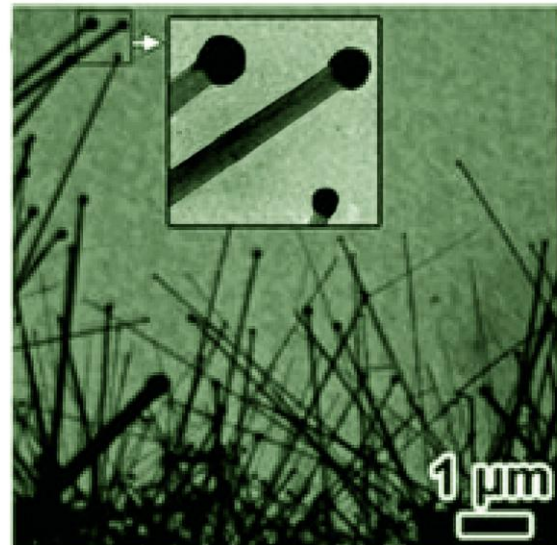
Daarnaast worden nanovezels boorcarbide gevormd die als het ware uit de koolstofvezels naar buiten steken. In figuur 14.54 staan opnames van deze structuur die met een elektronenmicroscop zijn gemaakt.

Links zie je een opname van een deel van het oppervlak van het behandelde lapje katoen, in het midden een uitvergroting van het uiteinde van een koolstofvezel, met daaruit stekend de nanovezels, en rechts een opname van de nanovezels.

c Leg aan de hand van deze foto's uit dat je echt mag spreken van *nanovezels*.

Figuur 14.55 laat zien dat aan het uiteinde van de nanovezels boorcarbide zich een bolletje bevindt dat steeds iets groter is dan de diameter van de nanovezel. Dit bolletje blijkt nikkelcarbide te zijn.

d Stel op grond van deze informatie een mechanisme op dat in grote lijnen beschrijft hoe de boorcarbide nanovezels aan de koolstofvezels 'groeien'.



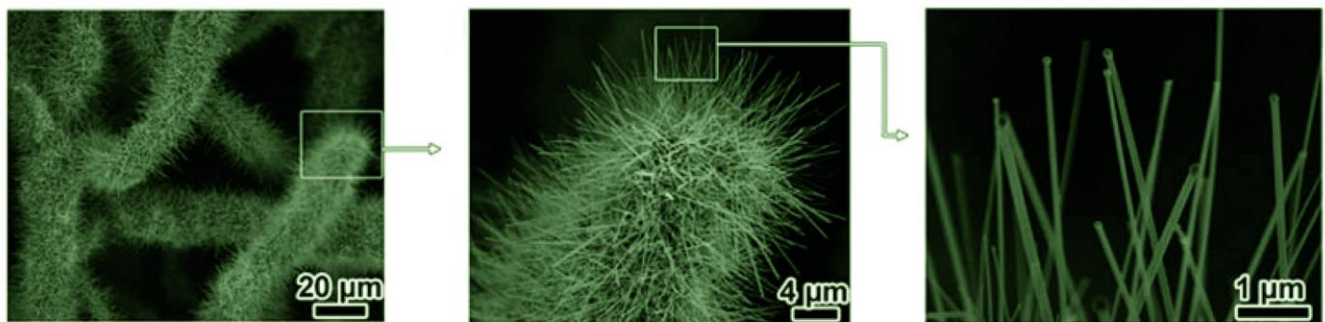
14.55 Detail van de boorcarbide nanovezel

e Leg uit hoe je het experiment zou kunnen aanpassen om een nanovezel met een andere diameter te maken.

f Leg uit hoe je het experiment zou kunnen aanpassen om een nanovezel met een andere lengte te maken.

Behalve sterk, licht en flexibel blijkt het bewerkte lapje ook 99,8% van de uv-straling van de zon tegen te houden, terwijl een gewoon lapje katoen slecht 85% tegenhoudt.

g Bedenk een experiment waarmee je kunt onderzoeken welke stof hiervoor verantwoordelijk is, de koolstofvezels of de boorcarbide vezels.



14.54 Beeld gemaakt met de elektronenmicroscop van de boorcarbide vezels in kogelwerend katoen

Je kunt nu

- aangeven op welke schaal nanotechnologie zich afspeelt;
- voorbeelden geven van stoffen die op nanoschaal bijzondere eigenschappen hebben;
- voorbeelden geven van enkele nanostructuren en hun toepassingen.

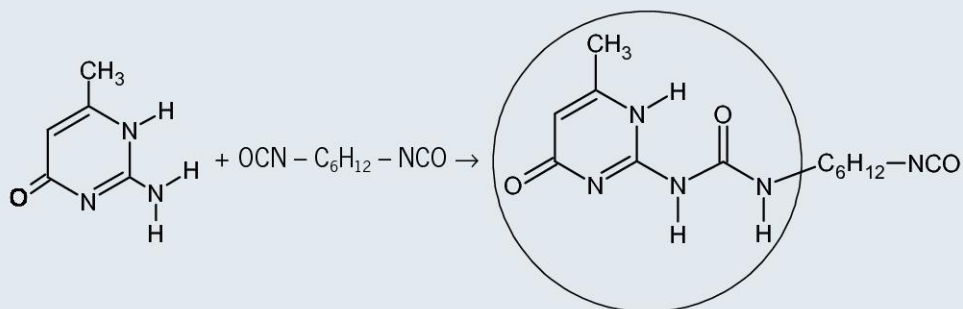
Afsluiting

1 Zelfherstellende verf

Onderzoekers aan de TU Eindhoven ontwikkelden een nieuw type polymeer dat kan worden toegepast in verf. Wanneer een verflaag die deze polymeersoort bevat is beschadigd, kan die eenvoudig worden hersteld door de verflaag te verwarmen.

De synthese van dit polymeer verloopt in twee stappen. In de eerste stap (reactie 1) reageert methylisocytosine met hexaan-1,6-di-isocyanaat, waarvan de schematische structuurformule $\text{OCN} - \text{C}_6\text{H}_{12} - \text{NCO}$ is. Deze reactie is hieronder weergegeven.

Reactie 1

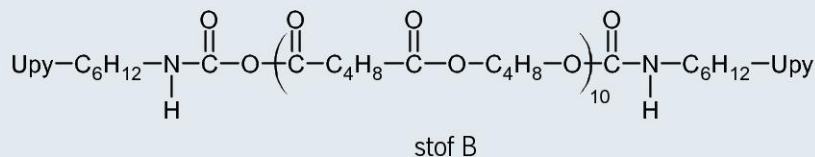
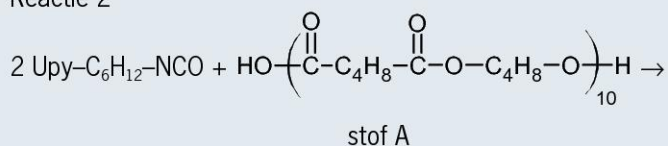


- Geef de volledige structuurformule van hexaan-1,6-di-isocyanaat.
- Geef de naam van het type reactie dat optreedt bij reactie 1. Licht je antwoord toe aan de hand van een kenmerkend structurelement op microniveau.

De omcirkelde groep in het reactieproduct van reactie 1 wordt de 2-ureido-4[1H]-pyrimidoongroep genoemd. In het vervolg van deze opgave wordt hij weergegeven met Upy. Het product van reactie 1 reageert in de tweede reactiestap met stof A. Zie reactie 2 hieronder. Stof A wordt van tevoren gevormd in een reactie van twee stoffen.

- Geef de reactievergelijking van de vorming van stof A. Gebruik voor de koolstofverbindingen structuurformules en tevens de notatie C_4H_8 .

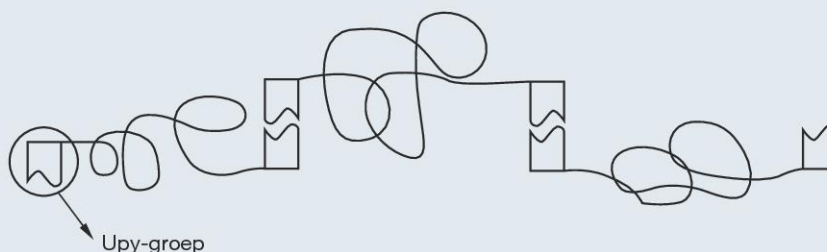
Reactie 2



Er ontstaat een zogenaamd supramoleculair polymeer, doordat moleculen van stof B zich via de Upy-groepen aan elkaar binden. In figuur 14.56 is een gedeelte van zo'n polymeer schematisch weergegeven.

- Leg uit of een supramoleculair polymeer een structuur op micro-, meso- of macroniveau is.

14.56 Schematische weergave van het supramoleculaire polymeer

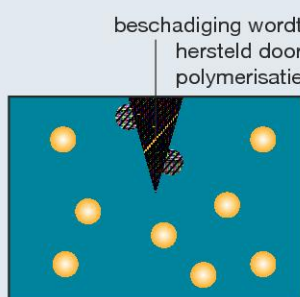
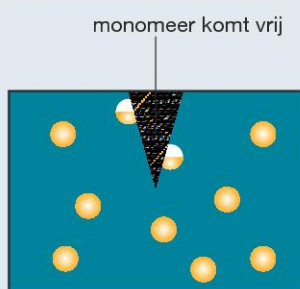
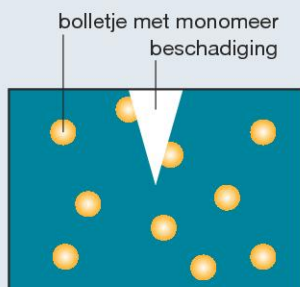


Aan elk uiteinde van een molecuul van stof B bevindt zich een Upy-groep. De Upy-groepen van twee verschillende moleculen van stof B zijn met elkaar verbonden via vier waterstofbruggen.

e Teken twee Upy-groepen en geef met vier stippellijntjes aan hoe ze door middel van waterstofbruggen aan elkaar zijn gebonden. Houd er rekening mee dat met de O-atomen van C=O-bindingen ook waterstofbruggen kunnen worden gevormd.

Door het aantal repeterende eenheden, het gedeelte in moleculen van stof B dat tussen haakjes staat, relatief laag te houden, krijgt het polymeer bijzondere eigenschappen. Een van die eigenschappen is dat krassen in verf waarin dit polymeer is verwerkt, gemakkelijk kunnen worden verholpen. De beschadigde verflaag wordt met een föhn verwarmd tot ongeveer 140 °C. Bij 140 °C worden de H-bruggen tussen de Upy-groepen verbroken en wordt de verf weer vloeibaar. Bij afkoelen tot kamertemperatuur wordt het oppervlak weer glad. Dit wordt het zelfherstellend vermogen van de verf genoemd.

f Leg met behulp van begrippen op microniveau uit waarom het zelfherstellend vermogen wel optreedt als het aantal repeterende eenheden in de moleculen van stof B laag is en niet als dit aantal te hoog is.



14.57 Een schematische weergave van de zelfherstellende werking van materiaal 2

Momenteel wordt behalve het hiervoor beschreven materiaal (materiaal 1) een andere soort zelfherstellend materiaal ontwikkeld. Dit materiaal (materiaal 2) bestaat onder andere uit een polymeer waardoorheen microcapsules en een katalysator zijn gemengd. De microcapsules bevatten monomeren. De katalysator bevindt zich buiten de microcapsules. Wanneer een scheurtje in het materiaal komt, worden ook microcapsules opengesloten. Hierdoor komen de monomeren vrij en kan, onder invloed van de katalysator, een reactie optreden waarbij nieuwe polymeren worden gevormd die de scheur opvullen, zie figuur 14.57.

Om een keuze te maken tussen beide soorten zelfherstellend materiaal, zul je, afhankelijk van de toepassing, de voor- en nadelen van elk van die materialen tegen elkaar moeten afwegen. Stel, je moet een keuze maken voor een zelfherstellende autolak en voor een zelfherstellende lak op de bladen van een windmolen.

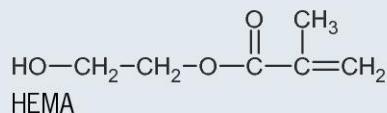
g Maak een beargumenteerde keuze uit materiaal 1 en materiaal 2 voor elk van de hiervoor genoemde toepassingen. Gebruik bij je argumentatie twee aspecten die je aan deze opgave ontleent.

Bron: CE vwo 2010-II

2 Koelen met hydrogel

Het koelen van kantoorgebouwen kost veel energie. Een manier om de energiekosten voor het koelen te verminderen is het dak van het gebouw met een sponsachtig materiaal te bedekken dat regenwater opneemt. Wanneer later de zon schijnt, verdampt het water waardoor het gebouw minder opwarmt. Een groep wetenschappers heeft onderzocht of een hydrogel hiervoor een geschikt materiaal is. Een hydrogel is een homogeen mengsel van een polymeer met water. De watermoleculen zijn ingesloten tussen de polymeerketens. Interacties tussen de ketens zorgen ervoor dat het mengsel niet vloeibaar is en niet ontmengt.

Wetenschappers onderzochten eerst of een hydrogel gebaseerd op het polymeer pHEMA geschikt was om gebouwen te koelen (figuur 14.58). pHEMA is het additiepolymeer van HEMA.



14.58 De Maastoren in Rotterdam wordt gekoeld met rivierwater.

pHEMA wordt bereid door aan een mengsel van HEMA met water een kleine hoeveelheid ammoniumpersulfaat, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, toe te voegen. De initiatiereactie van de polymerisatie is hieronder weergegeven.



Het deeltje $\text{SO}_4^{\cdot -}$ is het radicaal dat de polymerisatie op gang brengt.

- a** Geef een mogelijke lewisstructuur van het deeltje $\text{SO}_4^{\cdot -}$ waaruit blijkt dat het deeltje een radicaal is. Geef formele ladingen aan. De covalentie van zwavel is hier zes.

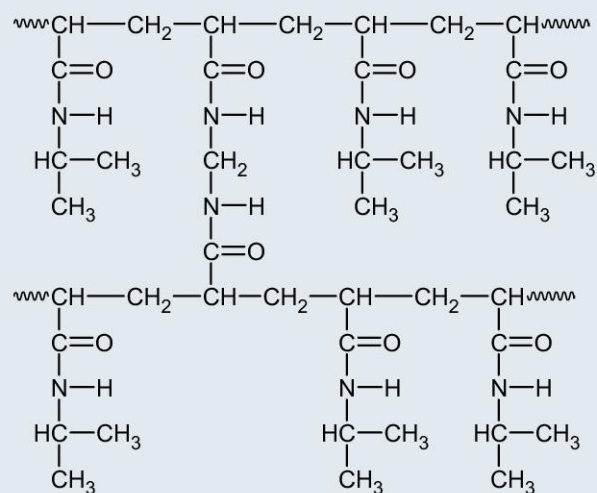
Het radicaal $\text{SO}_4^{\cdot -}$ reageert met HEMA, waardoor uiteindelijk pHEMA ontstaat.

- b** Geef de vergelijking van de propagatiereactie van een deeltje $\text{SO}_4^{\cdot -}$ met een molecuul HEMA. Geef het deeltje $\text{SO}_4^{\cdot -}$ aan met $\text{R}^{\cdot}$. Geef met pijlen aan hoe elektronen zich tijdens de reactie verplaatsen.

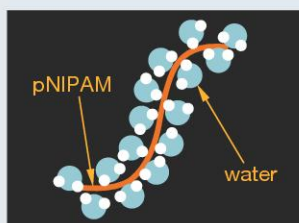
pHEMA kan veel water opnemen. Als pHEMA geheel met water wordt verzadigd, bedraagt het massapercentage water in de ontstane hydrogel 72%.

- c** Bereken hoeveel moleculen water per monomeereenheid in deze hydrogel van pHEMA worden opgenomen. Neem aan dat het massapercentage ammoniumpersulfaat in de hydrogel te verwaarlozen is.

Omdat pHEMA in de praktijk bleek tegen te vallen, is het verwante polymeer pNIPAM onderzocht. In de figuur hieronder is een gedeelte van de microstructuur van pNIPAM weergegeven. pNIPAM is een netwerkpolymeer dat wordt gemaakt uit twee monomeren. Bij de polymerisatie treden uitsluitend additiereacties op.



- d** Geef de structuurformule van het monomeer dat voor de crosslinks in pNIPAM zorgt.



Onder 33 °C neemt pNIPAM water op. De oppervlakte van pNIPAM is hydrofiel.



Boven 33 °C geeft pNIPAM water af. De oppervlakte van pNIPAM wordt hydrofoob.

14.59 Een model van pNIPAM met watermoleculen bij verschillende temperaturen

Als pNIPAM-korrels worden samengevoegd met water bij een temperatuur onder 33 °C zwelt het materiaal op door opname van water. Als een dak wordt bedekt met een laag pNIPAM-korrels, kan het materiaal tijdens regenbuien water opnemen. Als dan later de zon schijnt, neemt de natte hydrogel energie op én verdampt het water. Hierdoor zal een gebouw minder opwarmen.

Omdat het proces herhaalbaar is, kan het materiaal langere tijd worden gebruikt. Het eerder onderzochte pHEMA is niet geschikt voor deze toepassing omdat bij het verdampen van water zich een harde korst van pHEMA vormt. Hierdoor wordt de opname van water belemmerd.

De onderzoekers veronderstellen dat dit wordt veroorzaakt doordat tijdens het opdrogen de polymeerketens van pHEMA zich regelmatig rangschikken waardoor kristallijne gebieden worden gevormd. De interacties tussen de ketens zijn dan zo sterk dat watermoleculen niet meer tussen de ketens kunnen dringen.

e Leg uit op microniveau waarom in pNIPAM tijdens het opdrogen geen kristallijne gebieden worden gevormd.

Om de koelende werking van pNIPAM te onderzoeken, zijn temperatuurmetingen gedaan aan een miniaturhuis waarvan het dak met een laag pNIPAM-korrels is bedekt. Aan het begin van de meting werd de laag verzadigd met water. Het miniaturhuis werd vervolgens verwarmd onder een sterke lamp, terwijl de temperatuur van de natte hydrogel werd gemeten. De temperatuur van de natte hydrogel steeg door de opname van energie van 24 °C tot 33 °C.

Bij 33 °C bleef de temperatuur constant totdat al het aanwezige water was verdampt (figuur 14.59).

De totale hoeveelheid energie die op dat moment is opgenomen door de pNIPAM-laag hoeft niet meer door koeling te worden afgevoerd.

f Bereken hoeveel energie per m² is opgenomen door de pNIPAM-laag als gevolg van de temperatuurstijging en het verdampen van het water. Maak onder andere gebruik van de volgende gegevens:

- in de laag was 2,8 kg water per m² aanwezig;
- het massapercentage water in de pNIPAM-laag bedroeg 84%;
- de soortelijke warmte van de natte hydrogel bedraagt $4,0 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
- de verdampingswarmte van water bedraagt $2,26 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.

Naar: CE vwo 2017-II

3

Zonnecellen

De zon is een gratis energiebron, die elke uur meer energie naar de aarde uitstraalt dan de hele wereldbevolking in een jaar nodig heeft. Toch kost het nog veel moeite om die energie nuttig te gebruiken. Maar de ontwikkeling van goedkope zonnecellen met een hoog rendement kan daar verandering in brengen (figuur 14.60).

Traditionele zonnecellen zijn gemaakt op basis van silicium. Hoewel siliciumdioxide op aarde volop aanwezig is, is het vrijmaken en zuiveren van het silicium een kostbare zaak. In het kristalrooster van silicium zijn alle atomen door covalente bindingen met vier andere atomen verbonden.

a Bedenk naast de prijs nog een nadeel van silicium voor het gebruik in zonnecellen.

Zuiver silicium geleidt nauwelijks stroom, maar als in het kristalrooster een siliciumatoom wordt vervangen door een fosforatoom, komt een elektron van fosfor dat niet bij een binding is betrokken, beschikbaar voor geleiding. Dit wordt n-geleidend silicium genoemd.

b Teken de structuurformule met valentie-elektronen van n-geleidend silicium en leid af dat er een elektron beschikbaar is voor geleiding.



14.60 Zonnepanelen

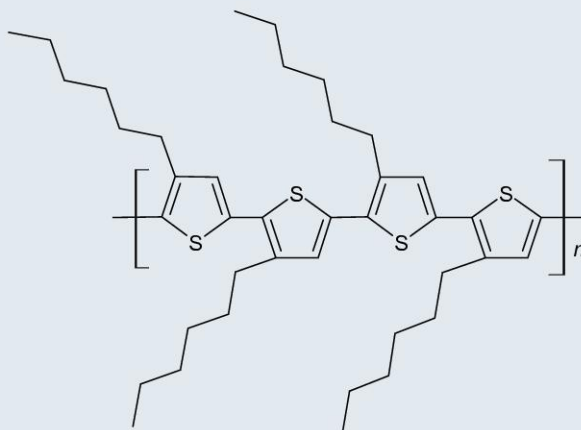
Een andere manier om silicium geleidend te maken, is door een klein deel van de siliciumatomen te vervangen door booratomen. Ook die passen mooi in het kristalrooster, met rond elk atoom vier andere atomen. Maar per booratoom is er nu een elektron te weinig voor binding, dat wordt een gat genoemd.

- c** Teken de structuurformule met valentie-elektronen van dit zogenoemde p-geleidend silicium en geef aan op welke manier dit materiaal stroom kan geleiden.

Het gebruik van geleidende polymeren in plaats van silicium voor zonnecellen lijkt veelbelovend.

- d** Noem twee voordelen van polymeren ten opzichte van silicium voor het gebruik in zonnecellen.

Een veelbelovend polymeer is poly-3-hexyl-thiofeen (P3HT), zie de structuur hieronder.



P3HT kan worden bereid door de polymerisatie van 2,5-dibroom-3-hexylthiofeen in aanwezigheid van zink. Bij deze reactie ontstaat tevens zinkbromide.

- e** Geef de reactievergelijking in structuurformules van deze polymerisatie.
f Geef een verklaring op microniveau voor het geleidende vermogen van deze polymeren.

Het rendement van polymere zonnecellen is niet zo hoog. Dit komt onder meer omdat de polymeren slechts licht van een bepaalde golflengte absorberen. Groningse onderzoekers werken aan een oplossing voor dit probleem.

- g** Doe een voorstel voor het verbeteren van deze polymere zonnecel waarbij licht van verschillende golflengtes wordt geabsorbeerd.



14.61 Boorcarbide zit in kogelwerende kleding.

4

Boorcarbide

Boorcarbide, B_4C , is één van de hardste stoffen die er bestaan. De stof heeft een uitzonderlijk hoog smeltpunt: ongeveer $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Boorcarbide wordt gemaakt door koolstof te laten reageren met diboortrioxide, waarbij ook koolstofmono-oxide ontstaat.

- a** Geef de vergelijking van deze reactie.

Aan het begin van de vorige eeuw dacht men dat boorcarbide een moleculaire stof was en er werden verschillende structuurformules voorgesteld.

- b** Geef de structuurformule van zo'n molecuul met één koolstofatoom en vier booratomen.



14.62 Ford Mustang

De bouw van een moleculaire stof kan de bijzondere macroscopische eigenschappen van boorcarbide echter niet verklaren.

- c** Leg uit, met behulp van begrippen op microniveau, waarom boorcarbide geen moleculaire stof kan zijn.

Er werd een alternatief model bedacht voor de bouw van boorcarbide, dat wel een afdoende verklaring kon geven voor de bijzondere eigenschappen.

- d** Beschrijf op microniveau het rooster van boorcarbide en geef aan hoe dit model de eigenschappen van boorcarbide wel kan verklaren.

Ford levert sportauto's waarin de aandrijf-as die de motor met de wielen verbindt is gemaakt van een composiet van aluminium met boorcarbide (figuur 14.62). Zo'n as kan sneller draaien dan een as van traditionele materialen en zonder noemenswaardige slijtage.

- e** Noem twee gunstige eigenschappen van aluminium die in deze toepassing zijn gebruikt.

- f** Noem ook twee gunstige eigenschappen van boorcarbide die in deze toepassing zijn gebruikt.

- g** Geef dit composiet weer in een tekening op mesoniveau, waarin de gunstige eigenschappen van beide materialen worden gecombineerd.

Keuzeopdrachten

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

1 Kernfusie

In deze opdracht onderzoek je de ontwikkelingen en mogelijkheden van kernfusie. Je gaat dieper in op de theorie van kernfusie en maakt energieberekeningen.

2 3D-printen

Met een 3D-printer kun je laagje voor laagje voorwerpen opbouwen in alle denkbare vormen. Maar zo'n gewone 3D-printer verwerkt alleen zachte thermoplasten. Kun je ook andere materialen in 3D printen, zoals metalen, keramische materialen of misschien wel voedingsmiddelen?

3 Vlamvertragers

Vlamvertragers redden levens. Bij een brand geven ze mensen de tijd om te ontsnappen. Het nadeel van veel vlamvertragers is dat ze schadelijk voor mens en milieu kunnen zijn. In deze opdracht onderzoek je welke verbindingen worden gebruikt als vlamvertragers en de chemische werking. Ook verdiep je je in de toepassing van nanocomposieten als vlamvertragers.

Overzicht begrippen

Atoomrooster	In een atoomrooster zijn niet-metaalatomen covalent verbonden in een driedimensionaal netwerk, bijvoorbeeld koolstofatomen in diamant.
Brosheid	Brosheid is een macroscopische materiaaleigenschap waarbij iets barst als je er met een hamer op slaat zoals bij keramische materialen en gietijzer (mengsel van ijzer en koolstof).
Composiet	Composiet is een samengesteld materiaal, waarbij de eigenschappen van de samenstellende stoffen elkaar versterken afhankelijk van de wijze waarop het materiaal is opgebouwd. Voorbeelden zijn glare (metaal en kunststof), gewapend beton (metaal en keramiek) en gebitsvullingen (kunststof en keramiek).
Corrosie	Corrosie is de aantasting van metalen door een redoxreactie met zuurstof en water. Onedele metalen worden beschermd tegen corrosie door bijvoorbeeld een verf- of poederlaagje of een beschermend oxidelaagje.
Geleidend polymeer	Een geleidend polymeer kan elektrische stroom geleiden. Dit is mogelijk door een afwisseling van dubbele en enkele bindingen in de polymeerketen: een geconjugeerd systeem.
Ionrooster	In een ionrooster zijn positieve en negatieve ionen om en om in een driedimensionaal netwerk gerangschikt. Vaste zouten hebben een ionrooster.
Keramische materialen	Keramische materialen zijn harde materialen, maar ook bros. Ze hebben een atoomrooster of een ionrooster. Voorbeelden zijn steen, glas, zand, porselein en diamant.
Legering	Een legering is een mengsel van metalen in vloeibare toestand gemengd.
Mesoniveau	Structuur gevormd door een aantal gegroepeerde deeltjes uit het microniveau, bijvoorbeeld metaalkristallen.
Metaalbinding	De metaalbinding is een binding tussen metaalatomen in een vast metaal. Metaalionen worden bijeengehouden door de vrije elektronen.
Nanotechnologie	Nanotechnologie houdt zich bezig met structuren op mesoniveau van ongeveer 10 tot 200 nm. Stoffen krijgen soms andere eigenschappen als ze met nanotechnologie worden gemaakt.
Roosterfouten	Roosterfouten zijn verstoringen, zoals ontbrekende, grotere of kleinere atomen in een metaalrooster of atoomrooster .
Standaardelektrodepotentiaal	De standaardelektrodepotentiaal (een getal in Binas tabel 48) geeft de edelheid van metalen aan. Hoe groter het getal, hoe edeler het metaal.

15 Groene chemie

Inhoud

- 15.1** Atoomeconomie
Experiment:
15.1 De blauwe fles
- 15.2** Energiebalans
Experimenten:
15.2 Exotherm of endotherm?
15.3 Verbrandingsenergie van stearinezuur
- 15.3** Reactiesnelheid
Experimenten:
15.4 Reactiesnelheid en concentratie
15.5 Reactiesnelheid en temperatuur
- 15.4** Blokschema's
- 15.5** Welk proces is groener?
- Afsluiting
- Overzicht begrippen





Chemie en milieu

Op het eerste gezicht lijken dit met sneeuw bedekte ijsschotsen in de Yamuna-rivier in India. In werkelijkheid is het een dikke laag schuim veroorzaakt door industriële vervuiling. Groene chemie is voor het milieu in India een noodzaak.

Titanium

Titanium is een sterk en licht metaal met een hoog smeltpunt. Het is even sterk als staal, maar ruim 40% lichter. Dit gecombineerd met de corrosiebestendigheid biedt veel toepassingsmogelijkheden, zoals in de carrosserie van de auto hiernaast, de Icona Vulcano Titanium, die volledig van titanium is. De prijs, 2,7 miljoen dollar, is nog wat aan de hoge kant voor massaproductie.



Je leert

- principes van groene chemie toepassen met atomeconomie, E-factor en rendement;
- rekenen met grenswaarden en de begrippen procent, promille, ppm en ppb.

15.1 Atoomeconomie

● Experiment 15.1



15.1 Titaniumplaatjes worden gebruikt bij het fixeren van botbreuken. Het metaal reageert niet in het lichaam en wordt niet afgestoten.

Principes van de groene chemie

Titanium is een van de meest voorkomende metalen op aarde, maar het is een erg duur metaal om te produceren. Daardoor heeft het gebruik van titanium in een sportwagen weinig met duurzaam materiaalgebruik te maken.

Het streven naar verduurzaming in de chemische industrie wordt **groene chemie** genoemd. Een aantal aspecten van **duurzaamheid** zijn al in hoofdstuk 7 besproken. In dit hoofdstuk gaan we dieper in op de groene chemie. Groene chemie maakt processen veiliger, gebruikt duurzame grondstoffen en energie en produceert minder afval. De twaalf uitgangspunten die voor de groene chemie zijn geformuleerd, kun je terugvinden in Binas tabel 97F.

In een productieproces dat voldoet aan de uitgangspunten van de groene chemie wordt zo veel mogelijk gewenst product gemaakt en zo min mogelijk afval. Met de **atomeconomie** bepaal je hoe efficiënt een productieproces is. Voor de atomeconomie geldt de definitie:

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

In de massa van de beginstoffen moeten *alle* beginstoffen worden meegenomen. Wanneer een reactie in oplossing verloopt, moet je dus ook de ionen van de beginstoffen die niet aan de reactie deelnemen in je berekening meenemen.

In rekenvoorbeeld 1 bekijk je nog eens een berekening van de atomeconomie aan de hand van het productieproces van titanium uit titanium(IV)oxide, het zogenaamde krollproces.



15.2 Grote aantallen elektrolysevatens naast elkaar. Het magnesiumchloride uit het krollproces kun je terugwinnen met elektrolyse.

In het voorbeeld is het krollproces vereenvoudigd voorgesteld. De berekening van de atomeconomie zag je al in hoofdstuk 7.

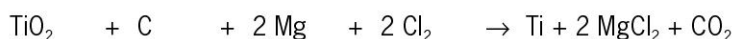
Rekenvoorbeeld 1

Bereken de atomeconomie van het productieproces van titanium.

Voor het verkrijgen van het titanium zijn twee reactiestappen nodig:



De totaalreactie van deze twee stappen is:



79,87 12,01 48,62 141,80 47,87 (massa van alle atomen in u)

$$\text{atomeconomie} = \frac{47,87}{79,87 + 12,01 + 141,80 + 48,62} \times 100\% = 16,96\%$$

Dit is zo geen groen proces, maar in het krollproces wordt het MgCl_2 teruggewonnen door het gesmolten MgCl_2 te elektrolyseren. Hierdoor stijgt de atomeconomie. Het MgCl_2 hoef je nu niet mee te nemen in de berekening van de atomeconomie, want het blijft in het proces.

$$\text{atomeconomie} = \frac{47,87}{79,87 + 12,01} \times 100\% = 52,10\%$$

Het terugwinnen via elektrolyse brengt enorme energiekosten mee en verhoogt dan wel de atomeconomie, maar maakt het proces niet duurzamer (figuur 15.2).

Naast de atomeconomie speelt ook het **rendement** een belangrijke rol bij het kiezen van een productieproces. Onder rendement wordt verstaan:

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



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

De theoretische opbrengst is de massa van het product die volgens een kloppende reactievergelijking maximaal bij een aflopende reactie kan ontstaan. De praktische opbrengst is de massa van het product, zoals die bij een bepaalde reactie in een chemische fabriek in werkelijkheid ontstaat. In paragraaf 7.3 van hoofdstuk 7 staat een voorbeeld van een rendementsberekening.

Bij een productie waar meerdere reacties na elkaar verlopen moet je de rendementen van alle stappen met elkaar vermenigvuldigen. Bij het ontwerpen van een productieproces moet je dus rekening houden met het rendement van elke stap.

E-factor en Q-factor

In de **E-factor** van een synthese wordt de informatie uit de atomeconomie en het rendement gecombineerd. De E staat voor *Environmental* (= milieu) en de E-factor is een maat voor de hoeveelheid afval die ontstaat bij een productieproces (figuur 15.3).

De E-factor is een hulpmiddel om de efficiëntie van verschillende processen te vergelijken.

Je kunt de E-factor weergeven als:

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

Je gebruikt bij de E-factor altijd de praktische opbrengst van het gewenste product. Hoe groter de atomeconomie en hoe hoger het rendement, des te lager is de E-factor. De formules voor de atomeconomie, rendement en E-factor vind je ook in Binas tabel 37H.

Naast titanium heeft ook het oxide van titanium veel toepassingen (figuur 15.4). In rekenvoorbeeld 2 zie je hoe titanium(IV)oxide in het sulfaatproces wordt geproduceerd. Je berekent de atomeconomie en de E-factor van dit proces.



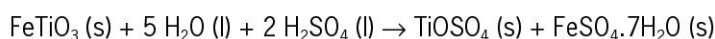
15.4 De witte m op M&M's is ook met titanium(IV)oxide getekend.

Rekenvoorbeeld 2

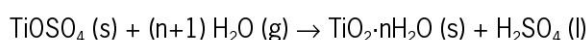
Bereken de atomeconomie en de E-factor van het sulfaatproces.

Het sulfaatproces verloopt in drie stappen.

Stap 1: Fijngemalen erts, ilmeniet, wordt omgezet in TiOSO_4 volgens:



Stap 2: TiOSO_4 wordt met stoom verhit:



Stap 3: Het titanium bevattende product wordt gedroogd:



Door optellen van de drie reacties vind je de totaalvergelijking van dit proces:



$$\text{atomeconomie} = \frac{m_{\text{product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} = \frac{79,87}{(151,72 + 6 \times 18,02 + 98,079)} \times 100\% = 22,32\%$$

Het rendement van dit proces is 80%, dat verwerk je in de formule van de E-factor.

$$E\text{-factor} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{werkelijke opbrengst product}}}{\text{massa}_{\text{werkelijke opbrengst product}}} = \frac{357,919 - 0,80 \times 79,87}{0,80 \times 79,87} = 4,60$$

Niet alleen de hoeveelheid afval die ontstaat bij een proces is belangrijk, maar ook de soort afval. Een reactie waarbij 10 000 kg koolstofdioxide wordt geproduceerd is een grotere vervuiler dan een reactie waarbij 10 000 kg water vrijkomt. Daarom is er ook een **vervuilingsfactor Q** ingevoerd. Onder de Q-factor verstaan we de mate waarin een stof vervuילend is.

Bijvoorbeeld:

- water $Q = 0$
- niet schadelijke zouten zoals NaCl $Q = 1$
- giftige producten $Q = 100 \dots 1000$

Om te bepalen hoe groen een synthese is, kijk je naar de E-factor en de Q-factor.



15.5 Afhankelijk van de werkplek zijn diverse soorten bescherming aan te raden.



15.6 De grenswaarde van asbest wordt regelmatig bijgesteld.



15.7 Het ontleden van ammoniumdichromaat levert een spectaculair proefje op. In verband met de giftigheid moet je dit in de zuurkast uitvoeren.

Grenswaarde

Om de veiligheid bij het werken met stoffen te bevorderen, is voor veel stoffen een **grenswaarde** vastgesteld. De grenswaarde is de maximaal toegestane hoeveelheid van een stof in mg per m^3 lucht op de werkplek. Bij de vaststelling van deze waarde wordt als uitgangspunt gehanteerd dat – voor zover de huidige kennis reikt – de gezondheid van de werknemers én hun nageslacht niet wordt geschaad bij herhaalde blootstelling aan die concentratie gedurende een arbeidsleven. Sommige grenswaarden worden door de overheid vastgesteld, maar de meeste ontstaan in onderling overleg tussen werkgevers en werknemers (figuur 15.5 en 15.6).

Ondanks het hanteren van grenswaarden kunnen er toch gevaarlijke situaties ontstaan door:

- gebrek aan toxicologische informatie;
- verschil in gevoeligheid van een persoon voor de stof;
- langere werktijden;
- blootstelling aan een mengsel van stoffen: dit kan extra of juist minder schadelijk zijn;
- onjuist meten van de luchtconcentratie.

In Binas tabel 97A vind je de grenswaarden van een aantal stoffen met een **TGG** (Tijd Gewogen Gemiddelde) van 8 uur. Binnen deze periode mag de concentratie tijdelijk wel hoger zijn als daardoor geen gezondheidsschade ontstaat, maar het 8-uur gemiddelde mag niet worden overschreden. In een aantal gevallen is er ook een grenswaarde met een TGG van vijftien minuten vastgesteld.

Stoffen die erg giftig zijn hebben een zeer kleine grenswaarde. Deze waarde wordt vaak uitgedrukt in **ppb** in plaats van in mg per m^3 . De aanduiding ppb staat voor 'parts per billion' en geeft het aantal delen per 10^9 delen weer. Dat komt overeen met het aantal μg van de stof per kg ($= 10^9 \mu\text{g}$) lucht.

$$\text{percentage stof X in een mengsel: } \frac{\text{hoeveelheid stof X}}{\text{hoeveelheid mengsel}} \times 100\%$$

$$\text{promillage stof X in een mengsel: } \frac{\text{hoeveelheid stof X}}{\text{hoeveelheid mengsel}} \times 1000\%$$

$$\text{aantal ppm stof X in een mengsel: } \frac{\text{hoeveelheid stof X}}{\text{hoeveelheid mengsel}} \times 10^6 \text{ ppm}$$

$$\text{aantal ppb stof X in een mengsel: } \frac{\text{hoeveelheid stof X}}{\text{hoeveelheid mengsel}} \times 10^9 \text{ ppb}$$

Bij deze berekeningen moeten de eenheden in teller en noemer gelijk zijn.

Rekenvoorbeeld 3

De grenswaarde voor ammoniumdichromaat (zie figuur 15.7) is $0,025 \text{ mg m}^{-3}$. Bereken hoeveel ppb dit is.

De dichtheid van lucht is $1,293 \text{ kg m}^{-3} = 1,293 \cdot 10^6 \text{ mg m}^{-3}$.

De grenswaarde is dan:

$$\frac{0,025 \text{ mg m}^{-3}}{1,293 \cdot 10^6 \text{ mg m}^{-3}} \times 10^9 = 19 \text{ ppb}$$

Titaniumproductie moet duurzamer

De aardkorst bevat veel titanium, in de vorm van de mineralen rutiel (TiO_2), ilmeniet (FeTiO_3) en perovskiet (CaTiO_3). Het meeste titaniumerts wordt omgezet in titanium(IV)oxide (TiO_2), dat wordt gebruikt voor de productie van titanium.

In voorbeeld 1 zag je de productiestappen van titanium al. Het is een duur en ingewikkeld proces door een aantal factoren, bijvoorbeeld:

- De reductie in stap 2 van TiCl_4 naar Ti wordt uitgevoerd met vloeibaar magnesium (smeltpunt Mg is 923 K).
- Het ontstane titanium moet onder vacuüm herhaaldelijk worden gesmolten om een zuiver product te krijgen (smeltemperatuur Ti is 1941 K). Het vacuüm is nodig om ongewenste reacties met stoffen uit de lucht te voorkomen.
- Het magnesiumchloride moet in gesmolten toestand worden geëlektrolyseerd (smeltpunt MgCl_2 is 987 K).

Er wordt dan ook door wetenschappers al tijden onderzoek gedaan naar een duurzamer proces. De meeste aandacht gaat daarbij uit naar de elektrolyse van titanium(IV)oxide. De laboratoriumresultaten zijn hoopgevend, maar opschaling naar productieniveau blijkt enor-

me problemen met zich mee te brengen die met name worden veroorzaakt door de hoge smeltemperatuur van titanium. De productie van titanium is de laatste zestig jaar toegenomen van ongeveer 1000 ton per jaar tot ruim 222 000 ton, een duurzamer proces is dus wenselijk.

Titanium is een zeer onedel metaal en reageert binnen enkele seconden met lucht of water en vormt daarbij titanium(IV)oxide, dat ondoordringbaar is voor zuurstof. Hierdoor zal titanium niet verder worden aangetast. Titanium kan bij hoge temperatuur ook met stikstof reageren. Het vormt dan aan het oppervlak het keiharde keramische materiaal titaniumnitride (TiN).

Ongeveer 5% van het titanium wordt gebruikt in de metaalindustrie voor protheses, racefietsen en brilmonturen, maar de grootste afnemer van het metaal titanium is de luchtvaart. Het meeste titanium wordt samen met composieten in vliegtuigen gebruikt. De Boeing 787 Dreamliner bestaat voor 15% uit titanium en voor 50% uit kunststof-composieten (figuur 15.8).

Bron: *Chemische Feitelijkheden*



15.8 De Boeing 787 Dreamliner

● Opdracht C7

Samenvatting

- Groene chemie is het toepassen van duurzame ontwikkelingen in de chemische industrie. De productieprocessen zijn gebaseerd op de principes van groene chemie.
- Atoomeconomie is het massapercentage atomen van de beginstoffen dat in het gewenste eindproduct komt.
- Het rendement is de praktische opbrengst als percentage van de theoretische opbrengst.
- De E-factor is de hoeveelheid afval per kg product. De E-factor is klein voor een synthese waarin weinig niet-buikbare bijproducten zijn.
- De grenswaarde is de maximaal toegestane hoeveelheid van een stof in de lucht op de werkplek en wordt gegeven in mg m^{-3} of in ppb. Ze kan ook in ppm, procent of promille worden gegeven.

Opdrachten

A 1

- a Geef de formule van de atomeconomie.
- b Geef de formule voor het rendement van een reactie.
- c Geef de formule voor de E-factor.
- d Wat is het verschil tussen de E-factor en de Q-factor?
- e Geef de definitie van de grenswaarde van een stof.

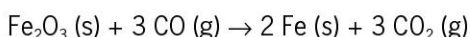
B 2

In een werkruimte is het gehalte aan formaldehyde in de lucht 125 ppb. ppb wordt uitgedrukt in $\mu\text{g m}^{-3}$ lucht. Omrekenen naar mg kg^{-1} lucht betekent vermenigvuldigen met 1,293 kg m^{-3} .

- a Bereken of de grenswaarde (TGG 8 uur) wordt overschreden.
- b Wordt de grenswaarde (TGG 15 minuten) overschreden?

B 3

Tijdens het hoogovenproces wordt ijzererts (Fe_2O_3) met koolstofmono-oxide omgezet in ijzer en koolstofdioxide volgens onderstaande reactie:



- a Bereken de atomeconomie van de productie van ijzer.
- b Bereken de theoretische ijzeropbrengst als 250 ton ijzererts reageert.
- c Bereken het rendement als er tijdens bovenstaand proces uit 250 ton ijzererts 141 ton ijzer ontstaat.

B 4 

Kaliumchloraat, KClO_3 , is een stof die gemakkelijk zuurstof afstaat. Het wordt gebruikt in mengsels die snel moeten kunnen ontbranden. Voor de productie van zuurstof in een laboratorium wordt KClO_3 ontleed door het te verhitten:



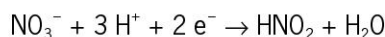
- a Bereken de theoretische opbrengst van O_2 uit 40,0 g KClO_3 .
- b Bereken de E-factor bij een rendement voor O_2 van 100%.
- c Bereken de E-factor bij een rendement voor O_2 van 67%.

B 5 De grondstoffen van stanyl

Stanlyl is een hittebestendig polymeer dat bij ongeveer 300 °C vloeibaar wordt. Het is een condensatiepolymeer van de monomeren hexaandizuur en butaan-1,4-diamine. Het butaan-1,4-diamine wordt in een aantal stappen bereid. In de laatste stap wordt butaan-1,4-diamine bereid uit waterstof en butaan-1,4-dinitril ($\text{N}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{N}$).

- a Geef de reactievergelijking voor deze laatste stap.
- b Bereken hoeveel m^3 waterstof ($T = 298 \text{ K}$, $p = p_0$) minimaal nodig is om 1,0 ton butaan-1,4-diamine te produceren uit butaan-1,4-dinitril. Een ton is 10^3 kg .

Hexaandizuur kan op meerdere manieren worden bereid. De bereiding van hexaandizuur door cyclohexanol ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$) te laten reageren met geconcentreerd salpeterzuur noemen we in deze opgave proces 1. De halfreactie van het salpeterzuur is hieronder gegeven.



- c Geef de vergelijking van de halfreactie van de omzetting van cyclohexanol tot hexaandizuur. Gebruik molecuulformules. In de vergelijking van de halfreactie komen ook H_2O en H^+ voor.
- d Leid met behulp van beide halfreacties de vergelijking van de totaalreactie voor proces 1 af.

In proces 1 wordt HNO_2 gevormd. Deze stof ontleedt bij de procesomstandigheden tot onder andere NO. De atomeconomie van proces 1 bedraagt 41,49%.

Een andere methode om hexaandizuur te maken (proces 2) is de reactie van cyclohexeen met waterstofperoxide (H_2O_2). Cyclohexeen reageert hierbij in een molverhouding van 1 : 4 met waterstofperoxide. Behalve hexaandizuur ontstaat hierbij alleen water.

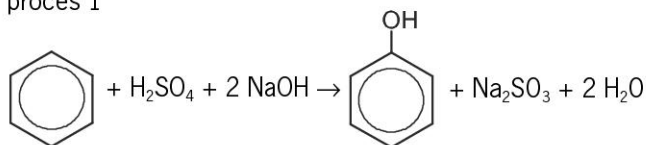
- e Bereken de atomeconomie (atoomefficiëntie) van proces 2.
- f Geef twee argumenten die je kunt gebruiken als je een keuze tussen proces 1 en 2 moet maken. Geef argumenten gebaseerd op informatie uit deze opgave en/of Binas tabel 97A.

Bron: CE wvo 2015-I

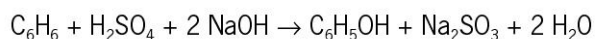
B 6 ★

Voor de productie van bisfenol A is fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) een belangrijke grondstof. Fenol is een bijtende, giftige en kankerverwekkende stof met een grenswaarde van 8 mg m^{-3} . Hieronder staan twee processen voor de productie van fenol $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$.

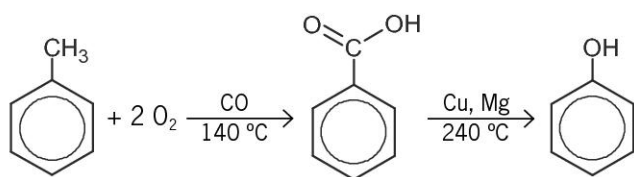
proces 1



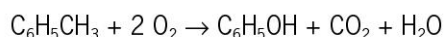
De vergelijking in molecuulformules voor proces 1 is:



proces 2



De vergelijking in molecuulformules voor proces 2 is:



- a** Bereken voor beide processen de atomeconomie en de E-factor. Ga ervan uit dat Na_2SO_3 in proces 1 niet kan worden verkocht. Ga uit van 100% rendement in beide processen.

Natriumsulfiet kan worden gebruikt als conserveringsmiddel in witte wijn.

- b** Bereken de atomeconomie van proces 1 als natriumsulfiet wel kan worden gebruikt.
c Leg uit welk proces de grootste Q-factor zal hebben.
d Geef aan welke voorzorgsmaatregelen je moet treffen bij het werken met fenol.

C 7

Lees de tekst in het kader 'Titaniumproductie moet duurzamer' en beantwoord de volgende vragen.

Het krollproces, dat nog steeds wordt gebruikt voldoet niet aan de uitgangspunten van de groene chemie.

- a** Bereken de atomeconomie voor de twee stappen van het krollproces uit voorbeeld 1 en geef aan welke stap het meest ongunstig is.
b Leg uit hoe je het proces zou kunnen verbeteren.
c Leg uit waarom de titaniumstaven tijdens het smelten bij de zuiveringsstappen voortdurend onder vacuüm worden gehouden.

De elektrolyse van gesmolten titanium(IV)oxide is een vrij kostbaar proces.

- d** Leg uit waarom dit zo is.
e Noem een praktisch probleem bij de elektrolyse van gesmolten TiO_2 .

Stel dat in een fabriek het rendement van het krollproces 72,5% is.

- f** Bereken bij dit rendement hoeveel kilogram titanium ontstaat uit 580 kg titanium(IV)oxide.



15.9 Het frame van deze racefiets is van titanium.

Experiment

15.1 De blauwe fles

Je bepaalt met behulp van de regels van de groene chemie welk experiment het groenst is.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat wordt verstaan onder groene chemie;
- de atomeconomie en het rendement van een productieproces berekenen;
- de E-factor van een gegeven proces berekenen;
- de Q-factor van een gegeven proces toelichten;
- uitleggen wat wordt verstaan onder de grenswaarde van een stof en hiermee rekenen.

Zonne-energie

In China kun je deze zonnepanelen vinden waarmee zonne-energie wordt opgewekt. Het oppervlak van dit project is maar liefst 1000 km². Door dit project wordt er ruim een miljoen ton steenkool minder verbrand. Hierdoor wordt de CO₂-uitstoot met 2,74 miljoen ton verlaagd. Voor China is dit een eerste stap op de goede weg.

**Je leert**

- energie-effecten van reacties in diagrammen weergeven;
- de begrippen vormingswarmte en reactiewarmte toepassen.

15.2 Energiebalans

● Experiment 15.2



15.10 Ook in de industrie wordt steeds meer gebruikgemaakt van groene energie.

Het energie-effect van een reactie

De zonne-energie die bij de panda op de zonnepanelen valt, wordt voor een deel omgezet in elektrische energie en verder in warmte. Op dit moment is het rendement van zonnepanelen ongeveer 20%. Daardoor kunnen ze nog niet genoeg energie per seconde leveren voor grote chemische fabrieken. In die fabrieken is namelijk veel energie nodig om een proces op gang te helpen. Je hebt al gezien dat elke stof een hoeveelheid chemische energie bezit en die hoeveelheid energie is voor elke stof verschillend. Bij chemische reacties kunnen verschillende soorten energie ontstaan, maar bij alle processen geldt dat de totale hoeveelheid energie constant blijft. Dit heet de **energiebalans**.

De **wet van behoud van energie** is altijd van toepassing: energie gaat niet verloren, maar wordt omgezet van de ene vorm in een andere vorm, zoals licht, warmte of elektriciteit. Bij alle processen treedt een **energie-effect** op, de reactie is exotherm als er energie vrijkomt en endotherm als er voortdurend energie wordt toegevoerd. Voor elke reactie geldt dat de reactie-energie (ΔE) gelijk is aan het verschil in chemische energie van de reactieproducten en de beginstoffen.

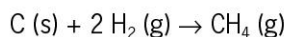
$$\Delta E = E_{\text{reactieproducten}} - E_{\text{beginstoffen}}$$

Bij een *exotherme reactie* komt energie vrij, de reactieproducten hebben dus minder chemische energie dan de beginstoffen. Het teken van de reactie-energie is dan negatief: $\Delta E < 0$ J. Bij een *endotherme reactie* wordt energie opgenomen, de reactieproducten hebben meer chemische energie dan de beginstoffen. Het teken van de reactie-energie is positief: $\Delta E > 0$ J. Omdat de reactie-energie meestal vrijwel volledig uit warmte bestaat, noem je de reactie-energie **reactiewarmte**.

● Experiment 15.3

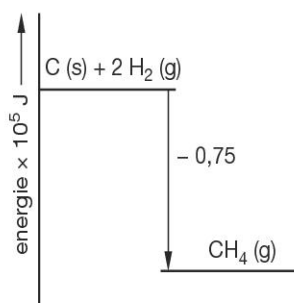
Vormingswarmte en reactiewarmte

Je kunt de reactiewarmte van een chemische reactie berekenen met behulp van de **vormingswarmte** van de deelnemende stoffen. De vormingswarmte is de energie die nodig is of vrijkomt bij de vorming van één mol stof uit de elementen. De chemische energie van de elementen stel je daarbij op nul. Bij de vorming van de meeste stoffen komt warmte vrij. In de tabellen 57A en B van Binas vind je de vormingswarmten van een aantal stoffen. Om je een voorbeeld te geven nemen we de vormingswarmte van methaan. Als je de stof methaan, CH_4 (g), uit de elementen koolstof, C (s), en waterstof, H_2 (g), wilt maken, is de vergelijking van deze reactie:

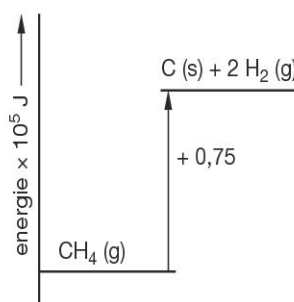


Bij deze exotherme reactie komt $0,75 \cdot 10^5$ joule aan energie per mol CH_4 vrij. Dat kun je schrijven als:

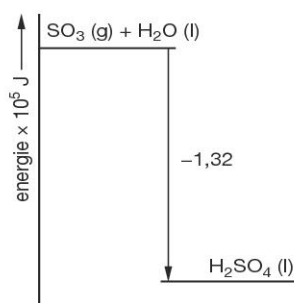
$$\Delta E = -0,75 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$$



15.11a Energiediagram van de vorming van CH_4 (g)



15.11b Energiediagram van de ontleding van CH_4 (g)



15.11c Energiediagram van de vorming van zwavelzuur

De vormingswarmte van CH_4 is $-0,75 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$. Als je één mol CH_4 ontleedt in zijn elementen is de reactie endotherm en de reactiewarmte is dan $\Delta E = +0,75 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$. Je moet energie toevoeren.

Je hebt tot nu toe energiediagrammen gebruikt waarin je ook de activeringsenergie weergaf, maar je kunt ook een vereenvoudigd diagram gebruiken waarbij je alleen de energieniveaus van de beginstoffen en de eindproducten en de reactiewarmte weergeeft. Voor de vorming van methaan uit de elementen en de ontleding van methaan zie je dat in figuur 15.11a en b.

De reactiewarmte van een reactie kun je berekenen met de vormingswarmten van de aan de reactie deelnemende stoffen. Daarbij maak je gebruik van de energiebalans waarbij je voor de $E_{\text{beginstoffen}}$ en de $E_{\text{reactieproducten}}$ de vormingswarmten gebruikt van de beginstoffen en de reactieproducten. In voorbeeld 1 en 2 zie je hoe je reactiewarmte moet berekenen.

Voorbeeld 1

Bereken de reactiewarmte van de vorming van zwavelzuur uit zwaveltrioxide en water.

De reactievergelijking is: $\text{SO}_3 \text{ (g)} + \text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (l)}$

Je zoekt de vormingswarmten op:

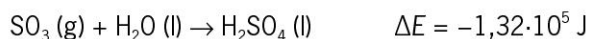
$$1 \text{ SO}_3: -3,96 \cdot 10^5 \text{ J} \quad 1 \text{ H}_2\text{O}: -2,86 \cdot 10^5 \text{ J} \quad 1 \text{ H}_2\text{SO}_4: -8,14 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De energiebalans van de reactie is:

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

$$\Delta E = (-8,14 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-3,96 \cdot 10^5 \text{ J} - 2,86 \cdot 10^5 \text{ J}) = -1,32 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De reactiewarmte = $-1,32 \cdot 10^5 \text{ J}$, een negatief getal, zie figuur 15.11c. Dat betekent dat de reactie exotherm is. De reactiewarmte kun je nu achter de reactievergelijking zetten:





15.12 Er zal steeds minder aardgas worden gewonnen. We zullen moeten overschakelen naar duurzame vormen van energie.



15.13 De gevolgen van de Nederlandse aardgaswinning zijn desastreus.

15.15 Wetenschappers in Engeland hebben een biosynthese ontwikkeld om uit butanol het gas propaan te maken. Een alternatief voor aardgas?

Voorbeeld 2

Bereken de reactiewarmte voor de volledige verbranding van methaan.

De vergelijking voor de verbranding is: $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

Je zoekt de vormingswarmten op:

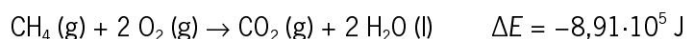
1 CH_4	$-0,75 \cdot 10^5 \text{ J}$
2 O_2	$2 \times 0 = 0 \text{ J}$
1 CO_2	$-3,935 \cdot 10^5 \text{ J}$
2 H_2O	$2 \times -2,86 \cdot 10^5 \text{ J} = -5,72 \cdot 10^5 \text{ J}$

De energiebalans van de reactie is:

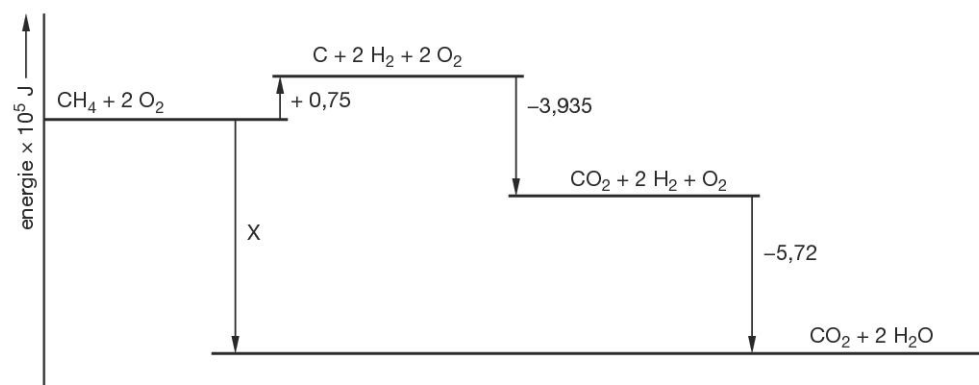
$$\Delta E = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}}$$

$$\Delta E = (-3,935 \cdot 10^5 \text{ J} - 5,72 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-0,75 \cdot 10^5 \text{ J}) = -8,91 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De reactiewarmte = $-8,91 \cdot 10^5 \text{ J}$, een negatief getal. Dat betekent dat de reactie exotherm is. De reactiewarmte kun je nu achter de reactievergelijking zetten:



Je kunt deze reactie ook in een energiediagram weergeven. In figuur 15.14 zie je dat je eerst de beginstoffen ontleedt in de elementen en daarna zie je in twee stappen de vorming van de reactieproducten. Eerst CO_2 en daarna H_2O . In dit schema vermeld je ook de coëfficiënten van de reactievergelijking. De vormingswarmten zijn immers in joule per mol gegeven.



15.14 Een grafische voorstelling van de verbranding van methaan. X = de reactiewarmte van deze verbranding.



Groen 'lage-energie' asfalt

Twee van de uitgangspunten van de groene chemie zijn:

- Energie-efficiënter ontwerpen. Probeer de energie die nodig is om een proces uit te voeren te verlagen.
- Gebruik van hernieuwbare grondstoffen.

Een bedrijf dat aan deze uitgangspunten invulling heeft gegeven is BAM, een Nederlands bouwconcern met zijn Lage Energie Asfalt Beton (LEAB). Nederland is een land met veel asfalt dat jaarlijks zo'n 9 miljoen ton asfalt verwerkt en produceert. Bij de productie van asfalt wordt oud asfalt gebruikt. Bij een traditioneel recyclingproces frees je oud asfalt van de weg, droog en verwarm je het tot 165 °C en meng je het simpel met nieuwe grondstoffen. In het nieuwe proces haal je eerst het oude asfalt uit elkaar. Asfalt bestaat voor 80% uit steentjes die direct herbruikbaar zijn. De rest van het asfalt is mastiek, een mengsel van zand, stof en bitumen (een aardolieproduct). Het bitumen veroudert op de weg en moet opgewaard worden met nieuw bitumen om het opnieuw te gebruiken.

Daarna wordt het nieuwe asfalt gemaakt. In tegenstelling tot het oude proces verwarm je de steentjes maar tot 105 °C in plaats van tot 165 °C. Dat scheelt 51% aan energie en 70% aan CO₂-uitstoot. De mastiek moet nog wel tot 165 °C worden verwarmd.

De laatste stap is het mengen van de steentjes met de mastiek. Om dit ook bij 100 tot 110 °C te doen heeft BAM een truc bedacht: eerst wordt wat water bij de mastiek gedaan, waardoor een schuim ontstaat en daarna wordt de mastiek met steentjes gemengd. Het resultaat van dit proces is een aantal proefstroken waarbij men gaat kijken hoe het wegdek zich houdt.

Het initiatief van BAM is niet het enige, er liggen ook proefstroken in Nederland waar de bitumen is vervangen door lignine, een reststroom uit de papierproductie en de productie van bio-ethanol. Dit bio-asfalt is een project van de Wageningen Universiteit en bevindt zich eveneens in de testfase. In de toekomst kunnen we zo op energie- en klimaatneutrale wijze asfalt maken.

Bron: C2W



15.16 In de toekomst alleen nog maar groen asfalt?

● Opdracht B15

Samenvatting

- Voor elk proces geldt de wet van behoud van energie. Die geef je weer in de energiebalans van het proces.
- Het energie-effect van een proces is: $\Delta E = E_{\text{reactieproducten}} - E_{\text{beginstoffen}}$. Bij een exotherm proces is $\Delta E < 0$ J, bij een endotherm proces is $\Delta E > 0$ J.
- In een energiediagram kun je de energieniveaus van beginstoffen, reactieproducten en tussenproducten aflezen.
- De vormingswarmte van een verbinding is de hoeveelheid warmte die nodig is of vrijkomt bij het vormen van één mol van de verbinding uit de elementen. De vormingswarmte van een element is nul. De reactie-energie van een chemische reactie wordt de reactiewarmte genoemd. Die kun je berekenen met behulp van vormingswarmten:

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

Opdrachten

A 8

- a Leg uit wat de termen exotherm en endotherm betekenen.
- b Wat houdt de wet van behoud van energie in?
- c Wat is de energiebalans van een proces?
- d Wat is een energiediagram?
- e Leg uit wat vormingswarmte is.
- f Wat is de betekenis van het begrip reactiewarmte?

A 9 

Leg aan de hand van de hoeveelheid chemische energie van de beginstoffen en de reactieproducten uit dat het energie-effect van een exotherm proces altijd negatief is en van een endotherm proces positief.

B 10

Je kunt in drie stappen zwavelzuur bereiden. Eerst moet je zwavel verbranden tot zwaveldioxide, vervolgens zet je het zwaveldioxide om in zwaveltrioxide. Als je dit zwaveltrioxide oplost in water ontstaat zwavelzuur (figuur 15.17).

- a Geef voor elk van deze stappen de reactievergelijking.
- b Bereken de reactiewarmte voor de bereiding van zwavelzuur met behulp van gegevens uit Binas tabel 57A.
- c Leg uit of het proces exotherm of endotherm is.

B 11

Je kunt zink maken uitgaande van zinksulfide. In de eerste stap van de productie reageert zinksulfide (sphaleriet) met zuurstof. Daarbij ontstaan zinkoxide en zwaveldioxide.

- a Stel de vergelijking voor deze reactie op.
- b Bereken de reactiewarmte van de bereiding van zink met behulp van gegevens uit Binas tabel 57A.
- c Leg uit of deze reactie exotherm of endotherm is.

B 12 

100 g water wordt verwarmd van 20 °C tot 100 °C. Daarvoor is $3,34 \cdot 10^4$ J aan energie nodig.

- a Geef de energiebalans van dit proces.

Vervolgens wordt verder verwarmd totdat al het water is omgezet in waterdamp van 100 °C.

- b Bereken met behulp van een gegeven uit Binas tabel 11 hoeveel energie hiervoor nodig is.
- c Geef de energiebalans voor deze omzetting.
- d Teken in één energiediagram de omzetting van 100 g water van 20 °C in 100 g waterdamp van 100 °C.

B 13

Er wordt op dit moment veel onderzoek gedaan naar thermochemische materialen, TCM's. In het bijzonder zouthydraten lijken geschikt. In de zomer wordt warmte gebruikt voor het dehydrateren van de zouthydraten. Hierbij wordt de warmte opgeslagen als chemische energie. In de winter wordt de chemische energie weer omgezet in warmte door de gedehydrateerde zouten met water te laten reageren. Het onderzoek gaat onder andere op dit moment over het gebruik van $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ als TCM.

- a Aan welke twee voorwaarden moet een hydraat voldoen wil het als TCM toepasbaar zijn?

In de zomer wordt calciumchloride gedehydrateerd.

- b Geef de vergelijking van de reactie die dan plaatsvindt.
- c Leg uit of dit proces exotherm of endotherm is.
- d Schets een energiediagram voor de reactie bij b.

Na toevoegen van voldoende water aan het gedehydrateerde calciumchloride treedt het omgekeerde warmte-effect op. Bij deze processen is de hoeveelheid warmte die wordt opgenomen en afgestaan steeds gelijk.

- e Leg bovenstaande uitspraak uit aan de hand van het energiediagram bij d.

Er wordt ook onderzoek gedaan naar gebruik van magnesiumsulfaatheptahydraat.

- f Geef de vergelijking van de reactie van magnesiumsulfaat met water waarbij dit hydraat wordt gevormd.
- g Is dit proces exotherm of endotherm?
- h Bereken hoeveel gram water je moet toevoegen aan 1,00 kg gedroogd magnesiumsulfaat om deze reactie volledig te laten verlopen.



15.17 Op de Rijn, vlak bij de rots Lorelei sloeg in 2011 een tanker met zwavelzuur om.

B 14

- a** Bereken de verbrandingswarmte van butaangas met behulp van de vormingswarmten (Binas tabel 57B).
- b** Vergelijk de gevonden verbrandingswarmte met de waarde die in Binas tabel 56 staat. Wat is je conclusie?

B 15

Lees de tekst in het kader 'Groen lage-energie asfalt' en beantwoord de volgende vragen.

Het recyclingproces van asfalt van BAM leidt tot energiebesparing en vermindering van CO₂-uitstoot. Een bepaalde asfaltcentrale produceert 180 000 ton asfalt per jaar. De energiekosten bij het traditionele proces zijn 327 MJ per ton asfalt. Ga ervan uit dat 70% van de energiekosten nodig is voor het verwarmen van de steentjes.

- a** Bereken de energiebesparing als de centrale overschakelt op het proces van BAM.

Per ton geproduceerd asfalt komt nu ongeveer 17 kg CO₂ vrij.

- b** Bereken de vermindering van de CO₂-uitstoot bij het nieuwe proces.

Bitumen kun je zien als de lijmstof in asfalt. Lignine heeft eenzelfde soort functie in planten en bomen en zou daarvoor geschikt kunnen zijn als vervanging voor bitumen. Bitumen heeft als nadeel dat het veroudert onder invloed van uv-straling. Lignine heeft een uv-stabiliserende werking.

- c** Leg met behulp van de bindingen in moleculen (microniveau) uit wat het voordeel op macroniveau van lignine is voor de levensduur van het asfalt.

C 16

In een hoogoven wordt ijzer gemaakt. Daarvoor laat men ijzererts, Fe₂O₃, reageren met koolstofmono-oxide. De reactieproducten zijn ijzer en koolstofdioxide.

- a** Geef de reactievergelijking van deze reactie.
- b** Bereken hoeveel ton ijzer kan ontstaan uit 1,00 ton ijzererts.
- c** Bereken de reactiewarmte voor dit proces.
- d** Is de reactie exotherm of endotherm?
- e** Teken een energiediagram voor deze reactie. Geef als tussenniveau de elementen.

C 17

De stof ammoniumnitraat is een bron van stikstof voor veel planten. Deze stof vormt dan ook een belangrijk bestanddeel van kunstmest. Eenmaal in de grond wordt ammoniumnitraat, onder invloed van bacteriën, omgezet in distikstofmono-oxide en water.

- a** Geef de vergelijking voor deze omzetting.

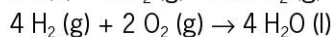
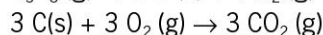
Je kunt voor deze ontledingsreactie de reactiewarmte berekenen door gebruik te maken van Binas tabel 57A.

- b** Bereken de reactiewarmte voor deze omzetting.
- c** Teken een energiediagram voor deze reactie.

C 18 ★

- a** Geef de reactievergelijking voor de verbranding van propaan.

Bij de verbranding van propaan zou je een aantal theoretische stappen kunnen onderscheiden:



- b** Maak een energiediagram met bovenstaande gegevens. Vermeld alle beginstoffen, tussenproducten en eindproducten, zowel als alle energie-effecten.
- c** Leid de verbrandingswarmte van propaan af met behulp van tabel 57A en B en je energiediagram.

Experimenten

15.2 Exotherm of endotherm?

Je onderzoekt het energie-effect van verschillende processen.

15.3 Verbrandingsenergie van stearinezuur

Je bepaalt hoeveel energie er vrijkomt bij de verbranding van stearinezuur.

- *Volledige instructie Chemie Overal online*

Je kunt nu

- exotherme en endotherme reacties en de bijbehorende activeringsenergie in diagrammen weergeven;
- uitleggen wat vormingswarmte is;
- de reactiewarmte van een reactie berekenen en uitleggen of deze reactie exotherm of endotherm is.

Koperen dak

Het gemeentehuis van het Duitse Hamburg heeft een koperen dak. Een koperen dak wordt na verloop van tijd groen door de vorming van kopercarbonaat en koperhydroxide.

De snelheid waarmee chemische reacties verlopen kan enorm verschillen. Zo duurt het vele jaren voor een koperen dak een zo mooi laagje groen heeft gekregen.

**Je leert**

- de reactiesnelheid berekenen;
- de snelheidsbepalende stap bepalen;
- aan de hand van een energiediagram de invloed van een katalysator toelichten.

15.3 Reactiesnelheid

- Experiment 15.4
- Experiment 15.5

Reactiesnelheid

In tegenstelling tot het groen worden van koper, waarvan de reactiesnelheid laag is, wil je in de industrie juist graag dat processen snel verlopen. Als de reactiesnelheid groot is, is de reactietijd klein en wordt de productiecapaciteit hoger, met mogelijk lagere kosten (figuur 15.18). Je hebt in hoofdstuk 1 al geleerd dat er vijf factoren zijn die invloed hebben op de reactiesnelheid: de soort stof, de concentratie van de beginstoffen, de verdelingsgraad, de reactietemperatuur en een katalysator.

De **reactiesnelheid, s** , is gedefinieerd als het aantal mol stof of het aantal mol deeltjes dat per seconde ontstaat of verdwijnt in een volume van één liter. De eenheid is $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$.



15.18 Een hoge reactiesnelheid kan bijdragen aan groene chemie.

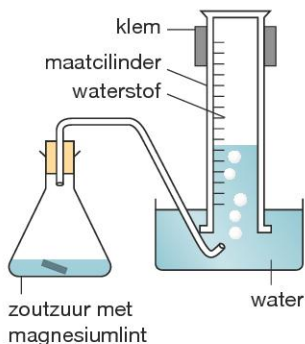
Voorbeeld 1

Bij de ontleding van SO_2Cl_2 (g) ontstaan zwaveldioxide en chloor. Uit metingen blijkt dat in een reactieruimte van $150,0 \text{ dm}^3$, vijf minuten na het begin van de ontledingsreactie, $1,8 \text{ mmol Cl}_2$ (g) is ontstaan. Bereken de gemiddelde reactiesnelheid.

De reactievergelijking is: SO_2Cl_2 (g) $\rightarrow$ SO_2 (g) + Cl_2 (g)

$1,8 \text{ mmol} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol Cl}_2$ is ontstaan in 5 minuten = 300 seconden. Het volume van het reactievat is 150 L .

De gemiddelde reactiesnelheid is $s = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol}}{150 \text{ L} \times 300 \text{ s}} = 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$.



15.19 Eenvoudige opstelling om de gasproductie te meten

Voorbeeld 2

In een redoxreactie reageert aluminium met H^+ tot Al^{3+} . Uit metingen blijkt dat in een reactieruimte van $1,00 \text{ dm}^3$, tien minuten na het begin van de reactie, $7,2 \text{ mmol } H_2 (g)$ is gevormd. Bereken de gemiddelde reactiesnelheid.

De reactievergelijking is: $2 \text{ Al (s)} + 6 \text{ H}^+ (\text{aq}) \rightarrow 2 \text{ Al}^{3+} (\text{aq}) + 3 \text{ H}_2 (\text{g})$

$7,2 \text{ mmol} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol } H_2$ is gevormd in 10 minuten = 600 seconden. Hier moet je opletten bij het invullen van de formule, want uit 2 mol Al ontstaat 3 mol H_2 . Dus uit 1 mol Al ontstaat 1,5 mol H_2 . De vorming van H_2 gaat dus 1,5 keer zo snel als het verdwijnen van Al. Een reactie heeft natuurlijk maar één snelheid, daarom moet je bij de berekening de hoeveelheid H_2 delen door 1,5. Die wordt dan $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol } H_2$.

De gemiddelde reactiesnelheid is: $s = \frac{4,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol}}{1,00 \text{ L} \times 600 \text{ s}} = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ mol L}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

De concentratie van de beginstoffen is een van de factoren die invloed heeft op de reactiesnelheid. Het verband tussen de reactiesnelheid en de concentratie van de beginstoffen bepaal je meestal experimenteel. Je doet een serie experimenten met verschillende concentraties beginstoffen waaruit je de reactiesnelheid berekent. Zie voorbeeld 3.



15.20 De vorming van zwavel is nog niet zichtbaar, je ziet het kruis onder de erlenmeyer.



15.21 Je meet de tijd op het moment dat het kruis niet meer zichtbaar is.

Voorbeeld 3

Bij het experiment in voorbeeld 1 onderzoek je ook hoe de ontleding van SO_2Cl_2 in chloor en zwaveldioxide verloopt bij verschillende concentraties van SO_2Cl_2 . Wat is het verband tussen de concentratie en de reactiesnelheid?

De reactievergelijking is: $\text{SO}_2\text{Cl}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{SO}_2 (\text{g}) + \text{Cl}_2 (\text{g})$

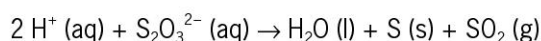
De concentraties van SO_2Cl_2 en de bij het experiment berekende reactiesnelheden staan in onderstaande tabel.

$\text{SO}_2\text{Cl}_2 (\text{mol L}^{-1})$	$s (\text{mol L}^{-1} \text{ s}^{-1})$
$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
$2,0 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
$4,0 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$
$8,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$

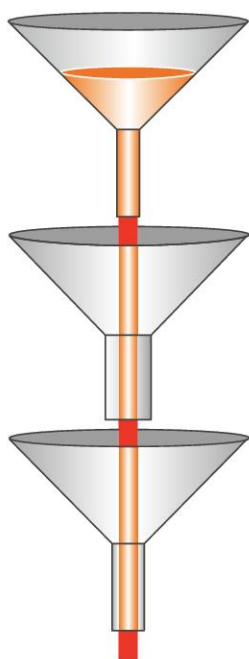
Je ziet in de tabel dat de reactiesnelheid twee keer zo groot wordt als de concentratie twee keer zo groot wordt. De reactiesnelheid is hier dus recht evenredig met de beginconcentratie van SO_2Cl_2 .

Als je bij een experiment de reactiesnelheid wilt meten, moet je kiezen voor een reactie waarvan je de concentratieverandering goed kunt meten. De snel verlopende neerslagreacties uit hoofdstuk 4 zijn hier niet geschikt voor.

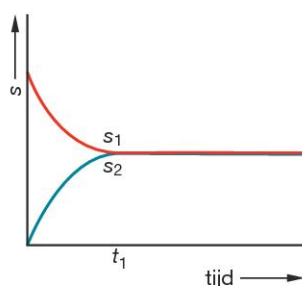
Een voorbeeld van een goed bruikbare reactie vind je in experiment 15.4 (figuur 15.20). We gebruiken hier de reactie die optreedt bij het samenvoegen van een oplossing van natriumthiosulfaat en zoutzuur. De reactie die verloopt is:



Bij deze reactie ontstaat onder andere het slecht oplosbare zwavel, waardoor de oplossing langzaam troebel wordt. Je kunt steeds de tijd meten die nodig is om een bepaalde troebeling te krijgen, zie figuur 15.21. Dit gebruik je dan bij de berekening van de reactiesnelheid.



15.22 De eerste stap, de bovenste trechter, is hier duidelijk snelheidsbepalend: de vloeistof kan door beide andere trechters sneller wegllopen.



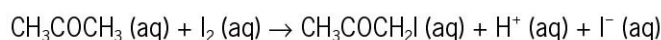
15.23 De instelling van een evenwicht. De snelheid naar rechts is s_1 , de snelheid naar links is s_2 en de insteltijd is t_1 .

Snelheidsbepalende stap

Een reactie verloopt lang niet altijd in één stap. Er is vaak sprake van een reactiemechanisme waarbij meerdere stappen achter elkaar verlopen. De langzaamste stap (zie figuur 15.22) bepaalt dan de snelheid van de totale reactie. Je kunt experimenteel bepalen welke stap het langzaamst verloopt en daaruit de reactiesnelheid bepalen. De concentratie van de beginstoffen in de langzaamste stap bepalen dus ook de reactiesnelheid. In voorbeeld 4 zie je zo'n reactiemechanisme uitgewerkt.

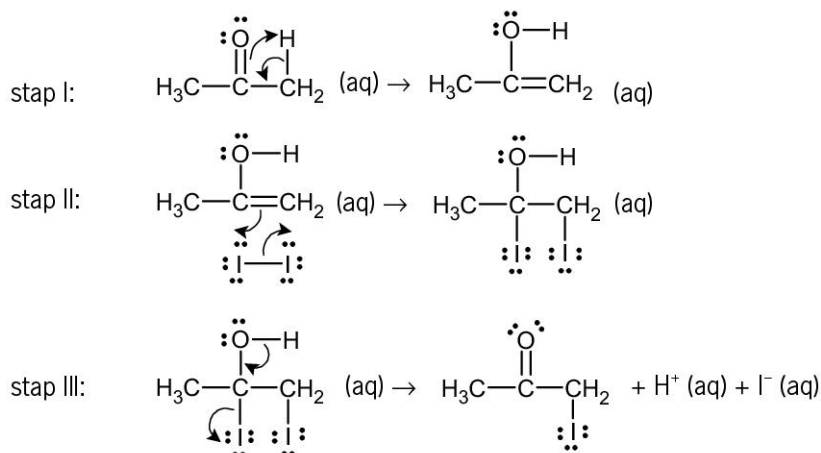
Voorbeeld 4: Snelheidsbepalende stap

De reactie van propanon met jood verloopt in drie stappen, waarbij experimenteel is bepaald dat de eerste stap het langzaamst is. De reactiesnelheid blijkt alleen afhankelijk te zijn van de concentratie van propanon. De reactievergelijking voor de totale reactie is:



Geef met behulp van een reactiemechanisme in drie stappen met structuurformules in lewisstructuren aan waarom de reactiesnelheid alleen afhangt van de concentratie van propanon.

Omdat de eerste stap het langzaamst is, moet de beginstof daar dus propanon zijn. Het reactiemechanisme kan dan zijn:



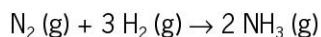
In dit reactiemechanisme komt in de eerste stap alleen propanon voor en de reactiesnelheid is dus alleen afhankelijk van de concentratie van propanon.

Reactiesnelheid en evenwicht

Veel reacties zijn evenwichtsreacties. In de industrie is dat knap lastig. Het rendement is daardoor immers relatief laag. Het is heel belangrijk dat de tijd tussen het begin van de reactie en het intreden van de evenwichtstoestand zo kort mogelijk is. Je noemt deze tijd de **insteltijd**, t_1 , van het evenwicht (figuur 15.23). Op de volgende bladzijde bekijk je hoe je de productie van ammoniak, die via een evenwichtsreactie verloopt, kunt versnellen.

De industriële productie van ammoniak

In een mengsel van stikstof en waterstof stelt zich na enige tijd het volgende evenwicht in:

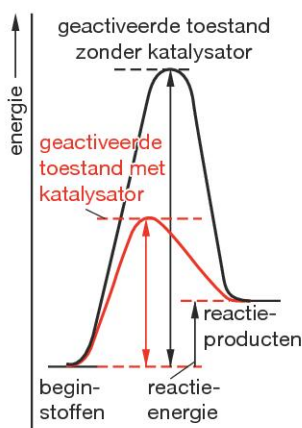


De vorming van ammoniak is exotherm. Om het evenwicht zo veel mogelijk naar rechts te verschuiven moet je de druk verhogen of de temperatuur verlagen (zie hoofdstuk 7).

Om een zo kort mogelijke insteltijd te bereiken, zoek je de meest gunstige combinatie van drie mogelijke maatregelen:

- Samenpersen van het gasmengsel. Hierdoor nemen de concentraties van de reagerende stoffen toe en daarmee nemen de snelheden van de reacties toe.
- Uitvoering van het proces bij hoge temperatuur. Elk proces verloopt dan weliswaar sneller, maar bij een exotherm proces is de opbrengst dan wel veel lager. Het evenwichtsmengsel bevat dus veel minder ammoniak dan bij lage temperatuur, maar de evenwichts-situatie wordt wel veel sneller bereikt.
- Het toevoegen van een katalysator, hierdoor worden de reactiesnelheden ook vergroot.

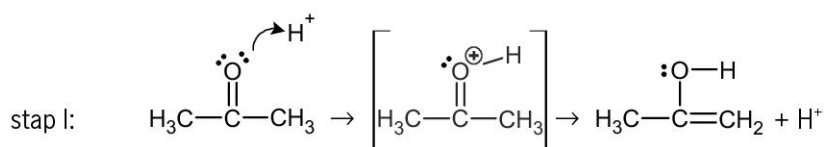
Voor de ammoniakproductie blijkt de meest gunstige combinatie een druk van 150 tot 250 bar, een temperatuur van rond de 450 °C en fijn verdeeld ijzerpoeder als katalysator te zijn.



15.24 Een katalysator zorgt voor een ander reactiemechanisme, de snelheidsbepalende stap heeft dan een lagere activeringsenergie.

Als je een **katalysator** in een productieproces met evenwichtsreacties gebruikt, neemt de snelheid van beide reacties evenveel toe. De ligging van het evenwicht zal daarom door toevoegen van een katalysator niet veranderen en de samenstelling van het evenwichtsmengsel blijft dus hetzelfde. Het voordeel van een katalysator is dat de insteltijd van het evenwicht kleiner wordt. Het punt t_1 wordt eerder bereikt, omdat de katalysator de activeringsenergie verlaagt, zoals je kunt zien in figuur 15.24.

Een katalysator kan op verschillende manieren invloed hebben op de reactiesnelheid. Eén van de manieren om de reactie te versnellen wordt veroorzaakt doordat in een reactiemechanisme een *andere* stap wordt gezet. Als voorbeeld kun je stap I in het reactiemechanisme uit voorbeeld 4 nemen. Deze stap blijkt een stuk sneller te verlopen als je H^+ als katalysator gebruikt. De eerste stap wordt dan:



Samenvatting

- De reactiesnelheid is het aantal mol stof of het aantal mol deeltjes dat tijdens de reactie per seconde ontstaat of verdwijnt in een volume van één liter. Het symbool voor de reactiesnelheid is s en de eenheid is $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$.
- Als een reactie via meerdere stappen verloopt, wordt de reactiesnelheid van de totale reactie bepaald door de snelheid van de langzaamste reactiestap.
- Bij een chemisch evenwicht hebben twee tegengesteld verlopende reacties dezelfde snelheid. De tijd tussen het begin van de reactie en het intreden van de evenwichtstoestand is de insteltijd. Een katalysator heeft geen invloed op de samenstelling van het evenwichtsmengsel, maar de insteltijd wordt kleiner.

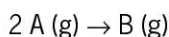
Opdrachten

A 19

- a Welke factoren bepalen samen de reactiesnelheid?
b Wat is het verband tussen reactietijd en reactiesnelheid?

A 20

Stof A neemt deel aan de volgende reactie:

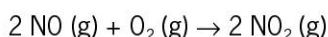


Tijdens een reactie daalt [A] in 8,40 minuten van 0,200 mol L⁻¹ tot 0,166 mol L⁻¹.

- a Bereken de gemiddelde reactiesnelheid waarmee stof B wordt gevormd voor het interval van 8,40 minuten in mol L⁻¹ s⁻¹.
b Waarom wordt bij a gesproken van *gemiddelde* reactiesnelheid?

B 21

In een reactievat van 10,0 dm³ verloopt de volgende reactie:



In 120 seconde blijkt zich in het reactievat 10,0 mmol NO₂ te hebben gevormd.

Bereken de gemiddelde reactiesnelheid in deze tijd.

B 22

Distikstofpenta-oxide is een kleurloze stof die bij hogere temperatuur ontleedt onder vorming van het bruine stikstofdioxide en zuurstof volgens de vergelijking:



In een experiment werden bij constante temperatuur resultaten verkregen, weergegeven in onderstaande tabel.

reactietijd (s)	[NO ₂]
0	0,00
500	2,96
1500	6,50
2500	8,26

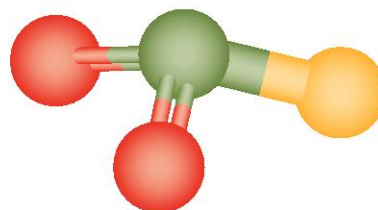
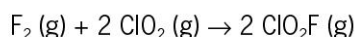
- a Teken een diagram waarin de concentratie van NO₂ tegen de tijd is weergegeven.

Op tijdstip $t = 0$ was [N₂O₅] 5,00 mol L⁻¹.

- b Bereken [N₂O₅] en [O₂] op elk van de tijdstippen die in de tabel zijn vermeld.
c Zet in het diagram van vraag a ook het verloop van de concentratie O₂ en N₂O₅ in mol L⁻¹ uit tegen de tijd.
d Bereken de gemiddelde reactiesnelheid voor de vorming van O₂ in mol L⁻¹ s⁻¹ voor elk van de volgende tijdsintervallen: 0-500, 500-1500 en 1500-2500.
e Zet in een diagram de berekende reactiesnelheden uit tegen de gemiddelde reactietijd, dat wil zeggen: de tijd halverwege een interval. Maak een schatting van de snelheid op tijdstip 0.
f Welke experimentele methode(n) kun je bedenken om de reactiesnelheid van bovengenoemde reactie te meten?

C 23

Men heeft bij verschillende concentraties de snelheid gemeten van de productie van chlorylfluoride (figuur 15.25). De reactie kun je als volgt weergeven:



15.25 Model van chlorylfluoride

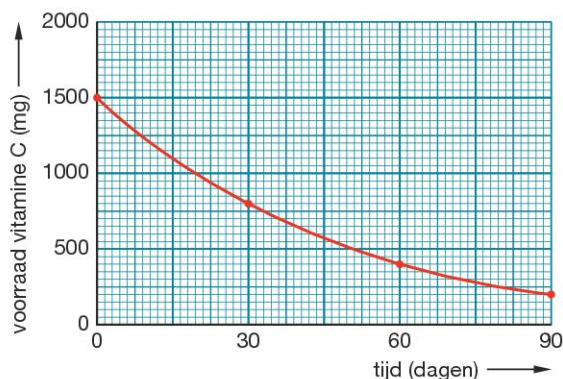
De experimentele gegevens staan in onderstaande tabel.

[F ₂]	[ClO ₂]	s (mol L ⁻¹ s ⁻¹)
0,10	0,010	1,2·10 ⁻²
0,10	0,030	3,6·10 ⁻²
0,10	0,040	4,8·10 ⁻²
0,20	0,010	2,4·10 ⁻²

- a Leg met behulp van de tabel uit welke stof(fen) de reactiesnelheid bepalen.
b Leg uit dat deze reactie niet in één stap verloopt.
c Stel een reactiemechanisme voor deze reactie op, dat in overeenstemming met de gegevens is.
d Leg uit welke stap in dit mechanisme de snelheidsbepalende stap is.

C 24

In een gezond menselijk lichaam bevindt zich een voorraad van ongeveer 1000 mg vitamine C. Deze voorraad wordt op peil gehouden door inname van ongeveer 30 mg vitamine C per dag. Als de lichaamsvoorraad vitamine C beneden de 300 mg komt, treden ziekteverschijnselen op, waaronder scheurbuik. In figuur 15.26 zie je een diagram dat het verloop van de lichaamsvoorraad vitamine C van een proefpersoon weergeeft, nadat die persoon is overgegaan van een dieet dat zeer rijk is aan vitamine C op een dieet zonder vitamine C.



15.26

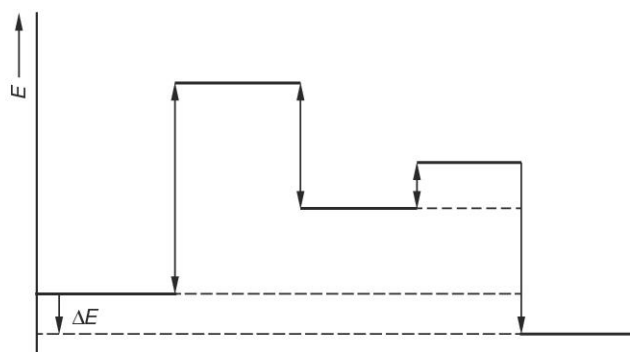
- Na hoeveel dagen zal deze proefpersoon gaan lijden aan scheurbuik?
- Bereken voor de drie tijdsintervallen 0-30, 30-60 en 60-90 dagen de gemiddelde verdwijnsnelheid van vitamine C in milligram per dag.
- Hoe verklaar je het verschil in verdwijnsnelheden die je bij vraag b hebt berekend?

Deel voor elk van de drie intervallen de gemiddelde verdwijnsnelheid door de gemiddelde lichaamsvoorraad vitamine C gedurende dat interval.

- Hoeveel procent van zijn lichaamsvoorraad vitamine C verliest de proefpersoon per dag?
- Bereken hoeveel milligram vitamine C de proefpersoon per dag moet slikken om zijn lichaamsvoorraad op 1000 mg te houden.

C 25 ★

Een exotherme reactie, $A + B \rightarrow C + D$, verloopt in twee stappen. Bij stap 1 reageert beginstof A als volgt: $A \rightarrow C + F$, waarbij F een tussenproduct is. Bij stap 2 reageert het tussenproduct met beginstof B volgens: $F + B \rightarrow D$. In figuur 15.27 vind je het onvolledige energiediagram van deze reactie.



15.27 Energiediagram

- Neem het energiediagram over en geef aan wat de pijlen en niveaus weergeven.
- Welke stap is bij deze reactie snelheidsbepalend?
- Teken een energiediagram voor het geval bij een vergelijkbare reactie $A + B \rightarrow C + D$, de andere stap snelheidsbepalend is.
- Leg uit dat bij het mechanisme waarbij de eerste stap sneller is, deze ook omkeerbaar is.
- Leg uit of bij het mechanisme waarbij de eerste stap sneller is, de tweede stap omkeerbaar is.

Experimenten

15.4 Reactiesnelheid en concentratie

Welke invloed heeft de concentratie van de reagerende stoffen op de snelheid van een reactie?

15.5 Reactiesnelheid en temperatuur

Welke invloed heeft de temperatuur van het reactiemengsel op de snelheid van een reactie?

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- de reactiesnelheid uitrekenen;
- experimenteel bepalen wat de snelheidsbepalende stap is, en dan de reactiesnelheid uitrekenen;
- een energiediagram tekenen en uitleggen waarom bij een evenwicht voor bepaalde reactieomstandigheden wordt gekozen.

Productieproces

Op het grote industrieterrein Chemelot in Limburg zit veel chemische industrie bij elkaar. Zo levert de ammoniakfabriek op het terrein ammoniak als grondstof aan de kunstmestfabriek daar. Deze bedrijven werken 24 uur per dag en 7 dagen van de week in een zogenaamd continu-proces. Om overzicht te houden over de productieprocessen worden de processen in blokschema's weergegeven.



Je leert

- verschillende soorten industriële processen onderscheiden;
- het weergeven van productieprocessen in een blokschema;
- rekenen aan chemische processen.

15.4 Blokschema's

Een chemische fabriek

Bij het goed laten verlopen van productieprocessen op een terrein als Chemelot is een groot aantal factoren van belang. In deze paragraaf maak je kennis met enkele van deze factoren. Bij de chemische industrie maak je onderscheid tussen de **fijnchemie** en de **bulkchemie**. Tot de fijnchemie horen onder andere farmaceutische bedrijven die vaak relatief kleine hoeveelheden van een stof maken waarvoor dan wel ingewikkelde syntheses nodig zijn (figuur 15.28). De meeste bedrijven in de chemische industrie houden zich bezig met de bulkchemie, het maken van enorme hoeveelheden van één product, zoals de ammoniakfabriek op Chemelot.



15.28 De productie van penicilline is een voorbeeld van fijnchemie.

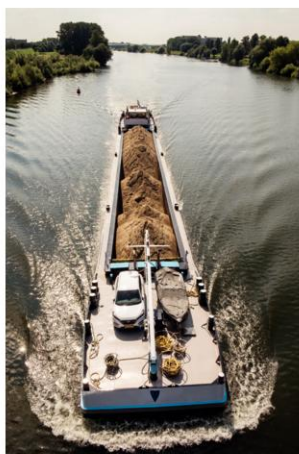
Processen in een chemische fabriek verlopen in een aantal verschillende stappen. Bij deze stappen heb je te maken met stofstromen en energiestromen. De massabalans en de energiebalans moeten voor elk onderdeel van het proces in orde zijn, dat wil zeggen dat er altijd evenveel in moet gaan als eruit komt.

De volgende globale stappen vind je in elke chemische fabriek.

Aanvoer, opslag en voorbereiding

Elk proces begint met de aanvoer van grondstoffen. Hiervoor is het nodig dat de fabriek goed bereikbaar is via de weg of het water. Het product van de éne fabriek is soms een grondstof voor een andere, in de opening van deze paragraaf zag je daar een voorbeeld van. Dat is de reden dat veel industrieën bij elkaar zijn gevestigd op industrieterreinen als Chemelot.

Opslag is van belang omdat er voldoende voorraad aan grondstoffen moet zijn zodat de productie ook door kan gaan als de aanvoer stagneert.



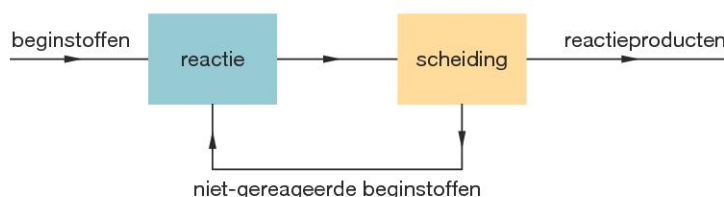
15.29 Vervoer over water wordt steeds belangrijker.

De voorbereiding is het geschikt maken van de grondstoffen voor de reactie door bijvoorbeeld zuivering, fijn verdelen van de grondstof of door de grondstoffen voor te verwarmen.

Reactie

De volgende stap is de chemische reactie die in een reactor plaatsvindt. Bij meer dan één uitgangsstof moeten deze stoffen in de juiste verhouding worden toegevoerd. Om economische redenen moet de reactiesnelheid zo hoog mogelijk zijn, hiertoe worden druk en temperatuur op een optimale waarde ingesteld en gemonitord tijdens het proces.

Een draaiend proces in een chemische fabriek kun je weergeven in een **blokschema**, waarvan je in figuur 15.30 een eenvoudig model ziet. Blokken geven een reactievat, een scheidingsapparaat of een ruimte voor de bewerking van stoffen aan. De pijlen stellen stofstromen voor. Bij de pijlen vermeld je de naam of de formule van de betrokken stoffen.



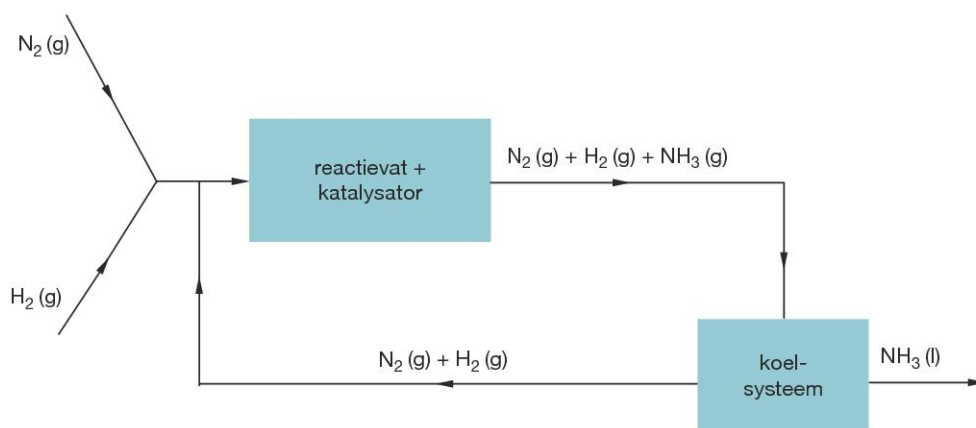
15.30 Algemeen model van een blokschema

Veel reacties zijn evenwichtsreacties, die je aflopend kunt maken door een reactieproduct aan het mengsel te onttrekken. Hierdoor wordt de opbrengst, het rendement, hoger. De overgebleven beginstoffen kunnen door **recirculeren** worden teruggevoerd naar de reactor (figuur 15.30). Als het nodig is de verhouding waarin de beginstoffen worden gemengd bij te stellen, worden de te recirculeren stoffen niet direct aan het reactievat toegevoegd, maar vermengd met de nieuwe aangevoerde beginstoffen, zie figuur 15.31.

Een katalysator staat niet bij de stofstromen, maar wordt eenmalig in de reactor gebracht. Voor elk blok geldt uiteraard dat de processen voldoen aan de wet van behoud van massa en energie.



15.32 Een batchreactor met eromheen een warmtewisselaar



15.31 Blokschema van de ammoniaksynthese met recirculatiestromen

Warmtebeheersing is bij alle productieprocessen belangrijk. Bij exotherme processen moet je warmte afvoeren en bij endotherme processen moet je voldoende warmte toevoeren. Warmte toe- en afvoeren gebeurt met warmtewisselaars, waarbij warmte van de ene buis wordt overgedragen aan de andere. Ze maken gebruik van het tegenstroomprincipe. Zie figuur 15.32 en 15.33.



15.33 Schematische weergave van een warmtewisselaar

Scheiding en zuivering

Bij een chemisch proces ontstaat vaak een mengsel waaruit het reactieproduct moet worden gewonnen. Zo wordt bij de productie van penicilline het reactiemengsel gefiltreerd, daarna vindt adsorptie met actieve koolstof plaats om ongewenste pigmenten te verwijderen en tot slot wordt geëxtraheerd met warme ethanol om de penicilline te verkrijgen.

Afval

Bij bijna alle processen ontstaat afval. Dat moet worden verwerkt en afgevoerd volgens veiligheids- en milieuwetten. Sommige fabrieken, zoals energiecentrales, gebruiken veel koelwater. Het opgewarmde koelwater wordt door gebruik van warmtewisselaars gekoeld en dan geloosd. Zo kan verhoging van de watertemperatuur in rivieren worden bestreden.

Soorten productieprocessen

Als bij een proces steeds een afgeronde hoeveelheid product wordt gemaakt is er sprake van een **batchproces**. Na elke batch wordt de reactor geleegd en opnieuw gevuld met de beginstoffen. Het proces heeft een duidelijk begin en eind (figuur 15.34).

Voordelen van een batchproces zijn:

- het is geschikt voor de productie van kleine hoeveelheden stof;
- het maakt het wisselen van product mogelijk;
- het eist geen volcontinudienst;
- het vergt lage investeringen.

Nadelen van een batchproces zijn:

- het geeft tijdverlies door het leeghalen, schoonmaken en vullen van de reactor en het opnieuw opstarten van het productieproces
- het is arbeidsintensief.



15.34 Een appeltaart bakken is een voorbeeld van een batchproces.



15.35 Het bakken van deze donuts is hier een continuproces.

Bij veel bedrijven is er een **voortdurende** aanvoer van beginstoffen en afvoer van reactieproducten. Deze productiemethode heet een **continuproces**, ammoniak wordt bijvoorbeeld geproduceerd in een continuproces. Een continuproces kent geen begin en eind.

Voordelen van een continuproces zijn:

- het is geschikt voor de productie van grote hoeveelheden stof;
- het wordt volautomatisch gestuurd;
- het is niet arbeidsintensief.

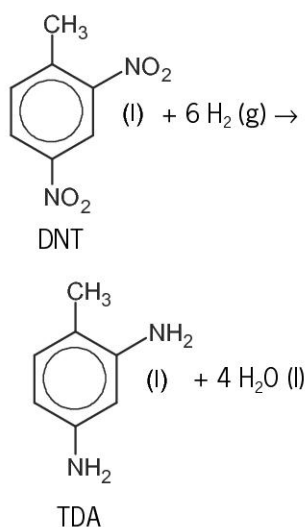
Nadelen van een continuproces zijn:

- het is pas rendabel bij de productie van grote hoeveelheden stof;
- het is alleen geschikt voor de fabricage van één soort product;
- het eist volcontinudienst;
- het vergt hoge investeringskosten.

De keuze van het procestype is afhankelijk van veel verschillende factoren die je zorgvuldig tegen elkaar moet afwegen. Veel processen binnen de chemische industrie zijn tegenwoordig continuprocessen. Ook daarbuiten komen continuprocessen voor (figuur 15.35).

Rekenen aan een blokschema

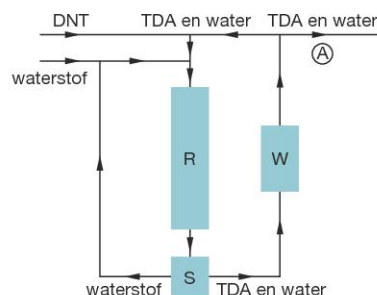
Met een blokschema kun je berekenen hoeveel stof je moet aan- en afvoeren om je proces op gang te houden. In het voorbeeld zie je hoe je dergelijke berekeningen kunt uitvoeren.



15.37 TDA is de grondstof voor de bereiding van polyurethanen, waar bijvoorbeeld matrassen en vloeren van worden gemaakt.

Rekenvoorbeeld

Bij de industriële bereiding van 4-methylbenzeen-1,3-diamine, weergegeven met de afkorting TDA, wordt een grondstof gebruikt die wordt aangeduid met de afkorting DNT. De reactie van deze bereiding staat hiernaast weergegeven. De reactie is exotherm. In figuur 15.37 staat het blokschema weergegeven van het continuproces van de bereiding van TDA.



R = reactor
S = scheider
W = warmtewisselaar
15.36

Om veiligheidsredenen moet de temperatuur in de reactor laag worden gehouden. Om dit te realiseren wordt steeds een kleine hoeveelheid DNT aan een mengsel van TDA en water toegevoegd. Dit mengsel wordt samen met de waterstof in de reactor gepompt.

Het mengsel van TDA en water treedt op als warmtebuffer. Het neemt de warmte op die bij de reactie vrijkomt en staat deze weer af in de warmtewisselaar. Een klein deel van het mengsel van TDA en water wordt bij A afgevoerd;

het grootste gedeelte wordt teruggeleid in de reactor. Bij een bepaalde opzet van dit continuproces wordt per minuut 25,0 g DNT gemengd met een kilogram van het mengsel van TDA en water.

Bereken hoeveel gram van het mengsel van TDA en water dat uit de warmtewisselaar komt, bij A per minuut moet worden afgevoerd. Ga er bij de berekening van uit dat de molverhouding TDA : water in dit continuproces gelijk blijft.

De hoeveelheid reactiemengsel die in het systeem zit, moet bij een continuproces constant blijven. De molaire massa van DNT is $182,1 \text{ g mol}^{-1}$ en van TDA $122,2 \text{ g mol}^{-1}$.

$$\text{Aangevoerd: } 25,0 \text{ g DNT} \triangleq \frac{25,0 \text{ g}}{182,1 \text{ g mol}^{-1}} = 0,137 \text{ mol DNT}$$

Dat levert $0,137 \text{ mol TDA}$ en $4 \times 0,137 = 0,549 \text{ mol H}_2\text{O}$. De totale massa die dus iedere minuut bij A moet worden afgevoerd is:

$$0,137 \times 122,2 \text{ g TDA} + 0,549 \times 18,02 \text{ g H}_2\text{O} = 26,7 \text{ g reactiemengsel}$$

Samenvatting

- Fijnchemie is het produceren van kleine hoeveelheden van een product. Bulkchemie is het produceren van grote hoeveelheden van een product. Beginstoffen die na de reactie overblijven worden gerecicleerd. Warmte wordt door een warmtewisselaar teruggewonnen.
- Er zijn twee soorten processen: batchprocessen en continuprocessen. Een batchproces is een productieproces waarbij telkens een afgeronde hoeveelheid van een product wordt gemaakt. Een continuproces is een productieproces dat 24 uur per dag doorgaat en volledig is geautomatiseerd.
- De processen in een chemische fabriek kun je weergeven in een blokschema.

Opdrachten

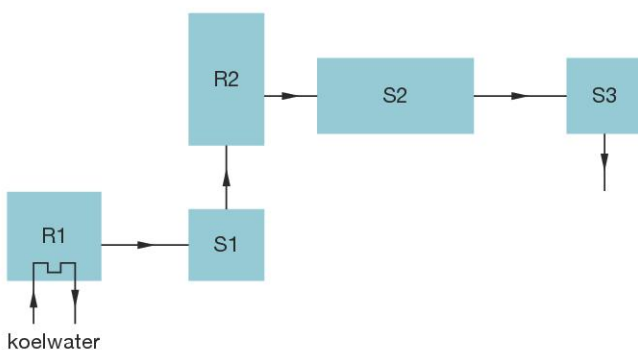
A 26

- Verklaar de termen batchproces en continuproces.
- Wat stellen de blokken in een blokschema voor?
- Wat stellen de pijlen in een blokschema voor?
- Wat zet je bij de pijlen in een blokschema?

B 27

De kunststof lexan wordt toegepast als coating van cd's en bijvoorbeeld als materiaal voor het venster in skibrillen. Lexan is een zogeheten polycarbonaat. Lexan wordt gemaakt uit twee monomeren. Eén van de monomeren van lexan is het gas fosgeen (COCl_2). Fosgeen is een zeer giftig zenuwgas en wordt daarom niet in grote hoeveelheden opgeslagen voor gebruik, maar ter plekke gemaakt uit chloor en koolstofmono-oxide.

In figuur 15.38 is een vereenvoudigd en onvolledig blokschema voor de productie van lexan weergegeven.



15.38 Blokschema voor de productie van lexan

In reactor 1 (R1) laat men een overmaat koolstofmono-oxide reageren met chloor. Het chloor reageert hierbij volledig.

Leg aan de hand van het blokschema uit of de vorming van fosgeen uit koolstofmono-oxide en chloor exotherm of endotherm is.

B 28

De omzetting van methanol in tetrachloormethaan gebeurt in twee stappen. In de eerste stap reageert methanol met waterstofchloride tot chloormethaan en water. Het mengsel dat nu is ontstaan moet eerst worden gescheiden voor je de volgende stap kunt uitvoeren.

- Geef de vergelijking voor deze reactie.
- Leg uit welke scheidingsmethode je hier kunt toepassen.

Het gevormde chloormethaan wordt na deze scheiding met chloor gemengd. Na reactie is onder andere het eindproduct tetrachloormethaan ontstaan. Daarnaast ontstaat ook waterstofchloride dat je na scheiding van de producten opnieuw kunt gebruiken.

- Welke bijproducten kunnen in de tweede reactiestap ontstaan?
- Leg uit of je alle gevormde waterstofchloride kunt hergebruiken in de eerste reactiestap.
- Teken het blokschema voor het beschreven proces.

B 29

Voor alle chemische reacties geldt de wet van massabehoud. Dit betekent dat voor het hele proces de massabalans in orde moet zijn. Het doet er niet toe of je met een batchproces of een continuproces hebt te maken.

- Leg uit waarom je in een chemische fabriek met massa's in kilogram of ton werkt in plaats van kilomol (kmol).

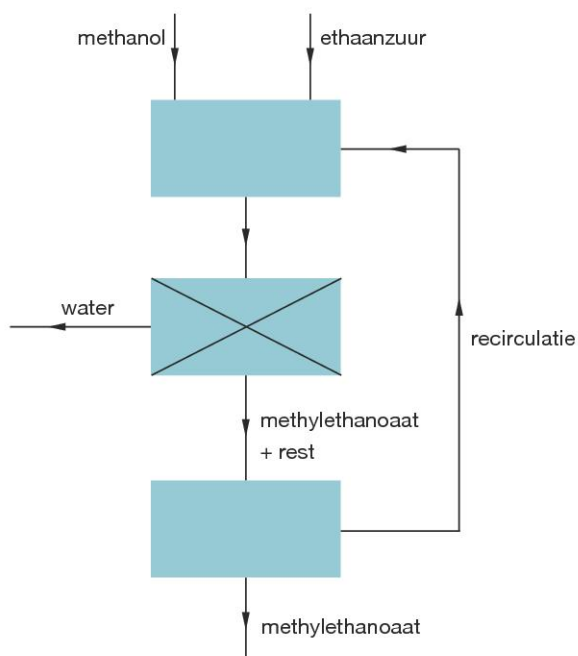
Voor de productie van een kleine hoeveelheid ammoniak uit de elementen wordt een batchproces gebruikt. De beginhoeveelheden zijn 50 kmol stikstof en 150 kmol waterstof. Er wordt 80 kmol ammoniak gevormd.

- Bereken de massa in kilogram van elk van de stoffen die in de evenwichtstoestand aanwezig zijn.
- Bereken het rendement van dit proces.

B 30

In het blokschema van figuur 15.39 zie je de bereiding van methylethanoaat weergegeven.

- Wat betekent het kruis in het middelste blok? Zie Binas tabel 38B1.
- Welke proces vindt achtereenvolgens in de drie blokken plaats?
- Waarom is het lastig om het reactiemengsel te scheiden?
- Leg uit of de recirculatiestroom nog moet worden gescheiden.
- Leg uit of het bij deze verestering gaat om een continuproces of een batchproces.
- Bereken hoeveel ton van de ester is gevormd op het moment dat er 1,4 ton water is verwijderd. Neem aan dat er ook 1,4 ton water is gevormd.



15.39 Blokschema methylethanoaat

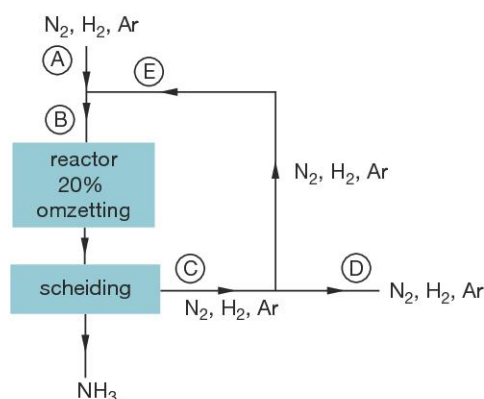
- g** Leg uit of de waterstroom uit zuiver water bestaat.
h Bereken de zuiverheid in massaprocent van het eindproduct wanneer er 6,2 ton product wordt afgetapt.
i Bereken hoeveel ton beginstoffen je moet toevoegen aan het eerste blok (verse voeding plus recirculatie) zodat het proces continu kan verlopen.

C 31 ★

In een ammoniakfabriek is de conversie 20%. De ammoniak wordt afgescheiden en de niet-omgezette stikstof en waterstof worden aangevuld met een nieuwe hoeveelheid en teruggevoerd naar de reactor. Doordat lucht wordt gebruikt bij de bereiding van het gasmengsel bevat dit een laag percentage argon. Dit edelgas komt ook in de reactor terecht. Als het argon niet wordt afgescheiden, zou de argonconcentratie in de reactor voortdurend stijgen.

- a** Leg uit waarom de argonconcentratie stijgt.

Om het oplopen van de argonconcentratie te voorkomen, wordt een klein deel van het reactiemengsel niet gerecicleerd, maar gespuid. In het blokschema van figuur 15.40 is een en ander weergegeven.



15.40 Blokschema ammoniakfabriek

In het gasmengsel van stikstof, waterstof en argon dat langs punt A wordt ingeleid, is de molverhouding $N_2: H_2: Ar = 80: 240: 1,0$.

De gasstromen die langs de punten A en E komen zijn zó op elkaar afgestemd, dat bij punt B een gasmengsel passeert met constante samenstelling. Per minuut passeert bij punt B 80 kmol N_2 , 240 kmol H_2 en 4,0 kmol Ar. Om een continuproces te verkrijgen waarin het percentage argon in de gasstroom constant is, wordt van het gasmengsel dat langs punt C de scheidingsruimte verlaat 1/16 deel via punt D gespuid.

- b** Bereken hoeveel kmol N_2 en hoeveel kmol H_2 per minuut je bij punt A moet inleiden om een continuproces te verkrijgen.
c Laat met een berekening zien dat het argonpercentage nu niet toeneemt.

Je kunt nu

- het verschil uitleggen tussen batch- en continuprocessen;
- een blokschema ontwerpen van een chemisch proces en daarin ook aangeven hoe recirculeren werkt;
- de functie van een warmtewisselaar uitleggen;
- rekenen aan chemische processen.

Jeans en aniline

De kunstenaar Ian Berry, ook wel Denimu genoemd, vindt dagelijks pakketten met oude jeans op zijn stoep. Hij maakt fraaie kunstwerken van die oude jeans, zoals hier een portret van Debbie Harry, legendarisch zangeres van de popgroep Blondie. Spijkerbroeken krijgen hun karakteristieke blauwe kleur door een behandeling met indigo, een kleurstof die wordt gemaakt uit aniline.

**Je leert**

- op grond van veel verschillende factoren voorspellen hoe groen een proces is;
- op grond van argumenten een (voorlopige) keuze maken voor één bepaald proces.

15.5 Welk proces is groener?

Het ontwerpen van een proces

De grondstof voor indigo is aniline. Bij het ontwerpen van een industrieel proces voor het produceren van aniline spelen een groot aantal verschillende factoren een rol. Je kent nu de atomeconomie, het rendement, de E-factor en de Q-factor. Dit zijn belangrijke factoren om rekening mee te houden.

Daarnaast moeten ook technische, economische en maatschappelijke problemen worden opgelost. Hierbij wordt gelet op:

- kostprijs van beginstoffen;
- veiligheid rond het werken met de stoffen;
- technische voorzieningen;
- energieverbruik;
- gemak en efficiëntie van het isoleren en zuiveren van het reactieproduct.



15.41 Biologische producten kunnen fossiele grondstoffen vervangen.

Ook de omgevingsfactoren spelen een belangrijke rol. Je moet daarbij denken aan de beschikbaarheid van (goedkope) energie en het gemak waarmee grondstoffen kunnen worden aangevoerd en reactieproducten afgevoerd. Je probeert door rekening te houden met deze factoren een chemisch proces zo groen mogelijk te laten verlopen (figuur 15.41).

In deze paragraaf houd je je bezig met de keuze van een proces. Je vergelijkt drie industriële processen met elkaar en toetst ze aan de principes van de groene chemie. Je kiest ten slotte op basis van argumenten het meest duurzame proces.



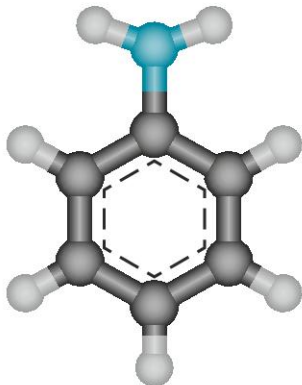
15.42 Is voor een productieproces goedkope en groene stroom beschikbaar?

Hoe groen is een proces?

Er zijn al heel wat factoren opgenoemd die met elkaar bepalen hoe groen een proces uiteindelijk is. Er worden pogingen ondernomen om in een getal uit te drukken hoe groen een proces precies is. Daarbij worden de factoren atomeconomie, rendement, E-factor en Q-factor betrokken. In deze paragraaf hebben we als voorbeeld voor de bereiding van aniline gekozen, een grondstof voor onder andere kleurstoffen. De systematische naam van aniline is aminobenzeen (figuur 15.43).

Drie mogelijk industriële processen

We bespreken drie processen om aminobenzeen, aniline, te maken. De structuurformule van aniline is:



15.43 Molecuulmodel van aniline



Als grondstof voor de productie van aniline kun je nitrobenzeen of chloorbenzeen gebruiken.

Bereiding van aminobenzeen uit nitrobenzeen

Dit gebeurt op twee manieren:

Proces 1: Het béchamp-proces, een batchproces. Nitrobenzeen wordt met ijzer en een geschikte katalysator in een redoxreactie omgezet in aminobenzeen. Dit proces werk je uit in opdracht 33.

Proces 2: Het hydreren van nitrobenzeen tot aminobenzeen in de gasfase met behulp van een geschikte katalysator. Dit is een continuproces, je werkt het uit in opdracht 34.

Bereiding van aminobenzeen uit chloorbenzeen

Proces 3: Het dow-proces. Chloorbenzeen reageert met een ammoniakoplossing tot aminobenzeen. Dit proces werk je uit in opdracht 35.



15.44 Nieuwe ontwikkelingen bij Covestro

Naast deze drie conventionele processen is het de materiaalfabrikant Covestro in 2017 gelukt aniline te maken uit plantaardige grondstoffen (figuur 15.44). In plaats van aardolie kan suiker worden gebruikt dat al op industriële schaal wordt gewonnen uit mais, stro en hout. In de eerste stap van het nieuwe procedé wordt een micro-organisme gebruikt als katalysator om de suiker om te zetten in een voorproduct voor aniline. In een tweede stap wordt dan met gebruik van een katalysator aniline gevormd. De koolstof in de aniline komt dan volledig uit hernieuwbare grondstoffen.

Samenvatting

- Een chemisch proces moet zo veel mogelijk voldoen aan de principes van de groene chemie.
- Een proces moet worden aangepast aan omgevingsfactoren.

Geschiedenis van aniline

Aniline werd in 1826 voor het eerst gemaakt uit natuurlijk indigo. Een goedkopere methode om aniline uit kolenteer te produceren werd ontdekt in 1855. Van de tweede helft van de negentiende eeuw tot het einde van de eerste wereldoorlog werd aniline uitsluitend als grondstof in de kleurstoffenindustrie gebruikt.

In 1865 begon de Duitse scheikundige Adolf von Baeyer met aniline te werken. Dit resulteerde in de synthese van indigo in 1880 (figuur 15.45). Drie jaar later werd de chemische structuur bekendgemaakt (figuur 15.46). De *Badische Anilin- und Soda-Fabrik* (BASF) ontwikkelde een commerciële productietechniek die vanaf 1897 in gebruik werd genomen. Rond 1913 was het natuurlijke indigo vrijwel geheel vervangen door synthetisch indigo. In 2002 werd wereldwijd ongeveer 17 000 ton indigo geproduceerd.

In 1968 werd nog maar 15% van de wereldproductie aan aniline in de kleurstoffenindustrie verwerkt.



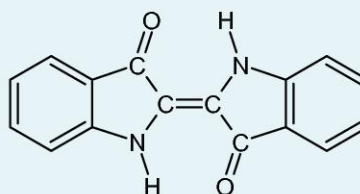
15.45 Indigo als kleurstof

Aniline is nu ook een belangrijke grondstof voor de rubberindustrie, de farmaceutische industrie en de foto-industrie. Aniline is ook een grondstof voor een bepaald polymeer.

De belangrijkste toepassing van indigo is het kleuren van spijkerbroeken. De kleur wordt ook wel gebruikt om wol navy blue te verven. Indigo bindt zich niet erg sterk aan de vezels in het textiel, waardoor slijtage en herhaald wassen ervoor zorgen dat de verf langzaam uit de stof verdwijnt.

Sinds ongeveer 1970 willen dragers van spijkerbroeken liever dat ze er van het begin af aan wat versleten uitzien. Daardoor zie je de originele donkere indigo kleur niet vaak meer op straat.

Indigo wordt ook gebruikt als pigment in de schilderkunst. Het is een vrij overheersende blauwe kleur, die enigszins naar groen neigt.



15.46 Structuurformule van indigo



15.47 Aniline wordt gebruikt om leer te verven. De stof zorgt voor mooi en soepel leer.

● Opdracht 33, 34 of 35

Opdrachten

A 32

Geef met een toelichting een aantal verschillen tussen een continu- en een batchproces wat betreft:

- a productiegrootte;
- b investeringskosten van de installatie bij eenzelfde productie;
- c aantal arbeidsplaatsen per eenheid product;
- d flexibiliteit wat betreft aard en hoeveelheid van het product.

In de volgende opdrachten bekijk je de drie bestaande industriële processen voor de productie van aniline. In overleg met je docent kies je één van die processen en je maakt de bijbehorende opdracht 33, 34 of 35.

Gegevens en opmerkingen

- Van de processen zijn alleen de belangrijkste onderdelen beschreven. De opbrengsten zijn voor het gemak op 100% gesteld en de vorming van sommige bijproducten is verwaarloosd.
- Afhankelijk van de manier waarop je afrondt kan de berekende massa voor en na de reactie iets verschillen.

Grootheden die je bij je proceskeuze nodig kunt hebben

Kookpunten

water	100 °C
nitrobenzeen	211 °C
aminobenzeen	184 °C
chloorbenzeen	132 °C

Oplosbaarheden bij 25 °C

3,5 g aminobenzeen lost op in 100 g water.

5,0 g water lost op in 100 g aminobenzeen.

- Nitrobenzeen lost praktisch niet op in water en omgekeerd.
- Chloorbenzeen lost vrijwel niet op in water en omgekeerd.
- Aminobenzeen en nitrobenzeen zijn volledig mengbaar.
- Aminobenzeen en chloorbenzeen zijn volledig mengbaar.

Dichtheden bij 25 °C

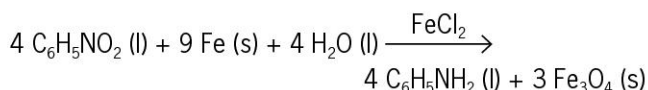
water	0,99 g cm ⁻³
nitrobenzeen	1,20 g cm ⁻³
aminobenzeen	1,02 g cm ⁻³
chloorbenzeen	1,11 g cm ⁻³

Op de chemiekaarten (in Binas, Veilig Practicum, Chemiekaarten of op de site) vind je allerlei informatie over veiligheid bij het werken met gevaarlijke stoffen.

B 33 Proces 1

De redoxreactie van nitrobenzeen tot aminobenzeen met ijzerkrullen.

In dit proces wordt ijzer(II)chloride als katalysator gebruikt. Het is een batchproces, per batch wordt 2000 kg nitrobenzeen omgezet. De vergelijking van de hoofdreactie is:



Het reactiemedium is water. De reactie is exotherm.

Nitrobenzeen en de ijzerkrullen worden in de molverhouding van 4 : 9 in een batchreactor gevoerd. De reactie verloopt het best als er per mol nitrobenzeen 4 mol water aanwezig is. Als de reactor vol is, wordt het mengsel op de reactietemperatuur van 100 °C gebracht. Met behulp van koeling blijft de reactietemperatuur op 100 °C gehandhaafd. De verblijftijd in de reactor bedraagt 8 uur, waarna deze wordt leeggemaakt.

Het gevormde Fe₃O₄ wordt door filtratie van de vloeistof-fase gescheiden. Het filtraat scheid je in een separator in een waterige en een organische fase. De waterige fase bevat weinig aminobenzeen en al het ijzer(II)chloride, dat als katalysator is gebruikt. Uit de organische fase wordt door middel van destillatie zuiver aminobenzeen gewonnen. De aminobenzeenopbrengst kan worden gesteld op 100%. IJzerchloride en nitrobenzeen zijn gemengd in de molverhouding 1 : 10. Het bij de filtratie afgescheiden Fe₃O₄ bevat een beetje aminobenzeen.

- a Bestudeer in hoofdstuk 1 nog eens de scheidingsmethoden en in het bijzonder destillatie en extractie.
- b Bereken hoeveel kilogram water en ijzerkrullen volgens de reactievergelijking nodig zijn voor de volledige omzetting van 2000 kg nitrobenzeen in aminobenzeen.
- c Bereken ook hoeveel kmol aminobenzeen en Fe₃O₄ hierbij worden gevormd.
- d Teken een blokschema van het proces in het geval dat er geen stof wordt gerecirculeerd.
 - Vermeld in ieder blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Vermeld de massa's van de ingaande en uitgaande stoffen bij het blokschema.
 - Ga na welke stoffen in aanmerking komen voor recirculatie.

- e Teken opnieuw het blokschema, nu met recirculatie.
 - Vermeld in elk blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Vermeld ook bij het tweede blokschema de massa van de ingaande en uitgaande stoffen.
 - Vermeld tevens de massa van de stoffen die worden gerecirculeerd.
- f Bereken voor dit proces de atomeconomie.
- g Bereken de E-factor voor dit proces.
- h Leg uit of je denkt dat de Q-factor voor dit proces hoog of laag zal zijn.

Fe_3O_4 wordt als pigment in de kleurstoffenindustrie verwerkt. Omdat Fe_3O_4 na filtratie nog aminobenzene bevat, wordt het met water schoongewassen. Om dit water te kunnen lozen moet eerst het aminobenzene eruit worden verwijderd.

- i Bedenk twee methoden waarop je dit kunt doen.

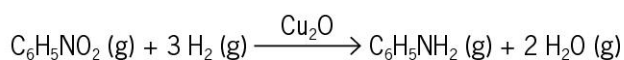
In de organische fase bevinden zich vaak nog enkele bijproducten met kookpunten boven de 200°C .

- j Hoe kunnen deze bijproducten worden gewonnen?
- k Leg uit of je de gerecirculeerde waterfase rechtstreeks in de reactor kunt leiden.
- l Stel een energiebalans voor de reactor op.

B 34 Proces 2

Bereiding van aminobenzene via een redoxreactie van nitrobenzene met waterstof in de gasfase onder invloed van een katalysator.

Het proces is een continuproces met een productie van 40 ton zuiver aminobenzene per dag. De reactievergelijking is:



De verse voeding bestaat uit zuiver nitrobenzene en waterstofgas. Nitrobenzene wordt vrijwel volledig omgezet in aminobenzene. De reactie is exotherm.

Vloeibaar nitrobenzene en waterstofgas worden bij kamertemperatuur samengebracht, voorverwarmd en in de buisreactor geleid. In de reactor bevindt zich koper(I)oxide als katalysator.

De reactietemperatuur bedraagt 280°C en de bedrijfsdruk is 1 atmosfeer. Van het in de reactor gevoerde waterstofgas wordt slechts 5% omgezet.

De reactiegassen worden in een condensor tot 50°C gekoeld. De daarbij ontstane vloeistoffen aminobenzene en water worden in een separator zo goed mogelijk van elkaar gescheiden. Het ruwe aminobenzene, dat nog water bevat, wordt door destillatie gezuiverd.

- a Bestudeer in hoofdstuk 1 nog eens de scheidingsmethoden en in het bijzonder destillatie en extractie.
- b Bereken zowel in kmol als in ton hoeveel nitrobenzene en waterstof volgens de reactievergelijking per dag nodig zijn.
- c Bereken zowel in kmol als in ton hoeveel water er per dag ontstaat.
- d Teken een blokschema van het proces in het geval dat er geen stof wordt gerecirculeerd.
 - Vermeld in ieder blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Vermeld de massa's van de ingaande en uitgaande stoffen bij het blokschema.
 - Ga na welke stoffen in aanmerking komen voor recirculatie.
- e Teken opnieuw het blokschema, nu met recirculatie.
 - Vermeld in elk blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Vermeld ook bij het tweede blokschema de massa van de ingaande en uitgaande stoffen.
 - Vermeld tevens de massa van de stoffen die worden gerecirculeerd.
- f Bereken voor dit proces de atomeconomie.
- g Bereken de E-factor voor dit proces.
- h Leg uit of je denkt dat de Q-factor voor dit proces hoog of laag zal zijn.

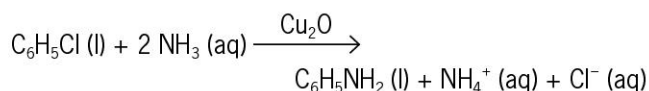
Het water dat uit de separator komt, bevat nog ongeveer 5 massa-% aminobenzene. Voordat het water kan worden geloosd moet het aminobenzene eruit worden gehaald.

- i Bedenk methoden waarmee je dit kunt doen.
- j Een veelgebruikte oplossing is extractie met nitrobenzene. Vul het tweede blokschema aan.
- k Stel een energiebalans voor de reactor op.

B 35 Proces 3

De bereiding van aminobenzene uit chloorbenzene en ammoniak bij aanwezigheid van een katalysator.

Het proces is een continuproces met een productie van 20 ton zuiver aminobenzene per dag. De reactievergelijking is:



De voeding bestaat uit zuiver chloorbenzene en ammoniak. Het toegevoerde chloorbenzene wordt in de reactor voor 50% omgezet. De opbrengst van het proces op basis van chloorbenzene bedraagt 100%. De reactie is exotherm.

Ammoniak wordt in water opgelost tot een oplossing met 20 massa-% NH_3 . Een mengsel bestaande uit chloorbenzeen, ammoniakoplossing en koper(I)oxide als katalysator wordt verwarmd tot de reactietemperatuur van 200 °C. Het mengsel wordt dan in de buisreactor geleid. De druk in de reactor is gelijk aan of groter dan de dampdruk van de reagerende stoffen. De reactie verloopt dus in de vloeistoffase.

De uit de reactor tredende vloeistofstroom wordt eerst gekoeld en daarna in een separator gescheiden in een organische en een waterige laag. Aminobenzeen wordt uit de organische laag, die verder nog bestaat uit chloorbenzeen, water en ammoniak, in een destillatiekolom afgescheiden. Om de waterige laag te kunnen recirculeren, ondergaat deze verscheidene behandelingen. Het koper(I)oxide wordt afgefilterd en naar de reactor geleid.

Dan wordt ammoniumchloride door kristallisatie afgescheiden, zodat voor het proces bruikbare stoffen als ammoniak, aminobenzeen en water kunnen worden teruggevoerd. In dit mengsel kan ammoniak worden opgelost.

De molverhouding van chloorbenzeen en ammoniak in de voeding van de reactor is 1 : 3.

De molverhouding van koper(I)oxide en chloorbenzeen is 1 : 5. Het verbruik van de katalysator kun je verwaarlozen.

Neem aan dat ammoniumchloride alleen in de waterige laag voorkomt en de hoeveelheden ammoniak en water in de organische laag zijn te verwaarlozen.

- a Bestudeer in hoofdstuk 1 nog eens de scheidingsmethoden en in het bijzonder destillatie en extractie.
- b Bereken zowel in kmol als in ton hoeveel chloorbenzeen en ammoniak volgens bovenstaande reactievergelijking nodig zijn voor de productie van 20 ton aminobenzeen per dag.
- c Bereken zowel in kmol als in ton hoeveel ammoniumchloride er bij het proces wordt gevormd.

- d Teken een blokschema van het proces in het geval dat er geen stof wordt gerecirculeerd.
 - Vermeld in ieder blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Ga na welke stoffen in aanmerking komen voor recirculatie.
- e Teken opnieuw het blokschema, nu met recirculatie.
 - Vermeld in elk blok welk proces plaatsvindt.
 - Vermeld de stofstromen, waar nodig.
 - Vermeld bij het tweede blokschema de massa van de ingaande en uitgaande stoffen.
 - Vermeld tevens de massa van de stoffen die worden gerecirculeerd.
- f Bereken voor dit proces de atomeconomie.
- g Bereken de E-factor voor dit proces.
- h Leg uit of je denkt dat de Q-factor voor dit proces hoog of laag zal zijn.
- i Wat zou je met het ammoniumchloride doen? Noem enkele argumenten voor je oplossing.
- i Stel een energiebalans voor de reactor op.

B 36

Wissel met de andere leerlingen in de klas je gegevens uit. Je hebt de berekeningen en resultaten van alle drie de processen nodig om de opdrachten 37 en 38 te kunnen maken.

B 37

- a Vergelijk de atomeconomieën van de drie processen met elkaar. Wat is je conclusie?
- b Vergelijk de E-factoren van de drie processen met elkaar. Wat is je conclusie?
- c Vergelijk de Q-factoren met elkaar. Wat is je conclusie?

B 38

Ben je er zeker van dat het proces dat je bij vraag 37 hebt gekozen het meest groene proces is? Welke factoren spelen, naast de atomeconomie, de E-factor en de Q-factor ook nog een rol?

Je kunt nu

- de factoren noemen die bepalen hoe groen een proces is;
- op grond van atomeconomie, E-factor en Q-factor voorspellen welk proces groener is;
- op grond van argumenten een (voorlopige) keuze maken voor één van de besproken processen.

Afsluiting

Oefenopdrachten

- 1** Zink kan op twee manieren uit zinkoxide worden gewonnen.
 Proces 1: Zinkoxide kan met methaan worden omgezet in zink, koolstofdioxide en water.
 Proces 2: Zinkoxide wordt met koolstofmono-oxide omgezet in zink en koolstofdioxide.
- Geef de reactievergelijking van proces 1 en bereken de atomeconomie.
 - Geef de reactievergelijking van proces 2 en bereken de atomeconomie.
 - Welk proces heeft de meest gunstige atomeconomie?
 - Bereken voor het proces met de gunstigste atomeconomie de E-factor als het rendement 70% is.

- 2** **a** Leg uit dat de atomeconomie van de productie van ammoniak uit de elementen 100% is.
b Bereken de E-factor van deze reactie als het rendement 65% is.
c Bereken hoe de E-factor verandert als het rendement van de reactie hoger wordt.

- 3** Je kunt methanol maken door koolstofmono-oxide te laten reageren met waterstof. Hierbij ontstaat uitsluitend methanol.
- Geef de vergelijking van deze reactie.

Onder bepaalde omstandigheden ontstaat uit 1,0 kg koolstofmono-oxide en een overmaat waterstof 0,80 kg methanol.

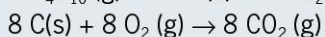
- Bereken het rendement van deze reactie.
- Bereken de E-factor van de reactie onder deze omstandigheden.

- 4** Butaan in campinggasflessen zorgt ervoor dat je kunt koken op de camping (figuur 15.48).
- Geef de reactievergelijking voor de verbranding van butaan.



15.48 Butaan als flessengas

Bij de verbranding van butaan zou je een aantal theoretische stappen kunnen onderscheiden:



- Leid de verbrandingswarmte van butaan af uit de vormingswarmten van butaan, zuurstof, koolstofdioxide en water.
- Maak een energiediagram van de gegevens die je bij a hebt gebruikt en vermeld alle beginstoffen, tussenproducten en eindproducten, zowel als alle energie-effecten.

5 Kerosine uit zonlicht

Europese chemici zijn erin geslaagd om vliegtuigbrandstof (kerosine) te produceren uit koolstofdioxide en water (figuur 15.49). De onderzoekers gebruikten voor deze omzetting een zogeheten solarreactor. Hierin wordt zonlicht gebundeld waardoor in de reactor een zeer hoge temperatuur ontstaat. De reactie (reactie 1) tussen koolstofdioxide en water verloopt bij hoge temperatuur (1000 K).





15.49 Een Boeing 747 gebruikt maar liefst 13 500 L kerosine per uur.

- a** Bereken de reactiewarmte voor reactie 1 per mol water. Neem aan dat je onder deze omstandigheden de waarden van de vormingswarmten uit Binas mag gebruiken.

Je moet de gevormde zuurstof verwijderen voordat het gasmengsel verder kan worden gebruikt. De onderzoekers hebben hiervoor in de reactor een fijn gaas aangebracht, bedekt met cerium(III)oxide.

Als cerium(III)oxide reageert met zuurstof ontstaat cerium(IV)oxide (reactie 2). Uiteindelijk wordt door reacties 1 en 2 een mengsel van CO en H₂ verkregen.

- b** Geef de vergelijking voor reactie 2.
c Bereken hoeveel mol cerium(III)oxide minimaal per mol CO₂ aanwezig moet zijn voor het wegvangen van alle zuurstof die ontstaat bij reactie 1.

Het in de reactor gevormde cerium(IV)oxide kan door sterke verhitting weer worden omgezet tot cerium(III)oxide (reactie 3). De onderzoekers willen reacties 1 en 2 uitvoeren met een continue instroom en uitstroom van de gassen. Om de productie van CO en H₂ als een continuproces uit te voeren moeten reacties 1 en 3 tegelijk plaatsvinden.

- d** Geef een mogelijk blokschema van deze productie van CO en H₂. Uit het antwoord moet blijken dat het proces als een continuproces verloopt. Geef reactoren en stofstromen weer. Zet bij alle stofstromen de namen en/of formules van de stoffen.

Naar: CE vwo 2017-II



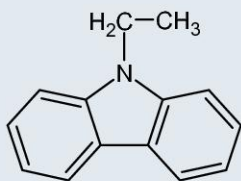
6

Waterstofopslag in carbazool

Waterstof wordt pas een alternatief voor het gebruik van benzine als autobrandstof wanneer waterstofauto's met een volle tank eenzelfde afstand kunnen afleggen als een gangbare benzineauto met een tank gevuld met 50 L benzine. Uit metingen is gebleken dat een benzineauto voor het afleggen van eenzelfde afstand tweemaal zo veel chemische energie nodig heeft als een waterstofauto.

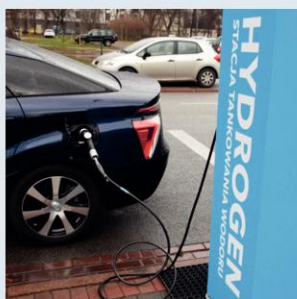
- a** Bereken hoeveel kilogram waterstof een auto moet tanken om dezelfde afstand af te leggen als een benzineauto met een tank gevuld met 50 L benzine ($T = 298 \text{ K}$, $p = p_0$). Bij beide verbrandingen komt het water als gas vrij. Bij de verbranding van 1,0 m³ benzine komt $3,3 \cdot 10^{10} \text{ J}$ vrij.

Waterstof als brandstof heeft als groot nadeel dat je het onder hoge druk moet opslaan (figuur 15.50). Daarom wordt veel onderzoek gedaan naar manieren om waterstof chemisch aan een drager te binden. Recent onderzoek richt zich op N-ethylcarbazool als waterstofdrager. Hieronder zie je de structuurformule van deze stof.



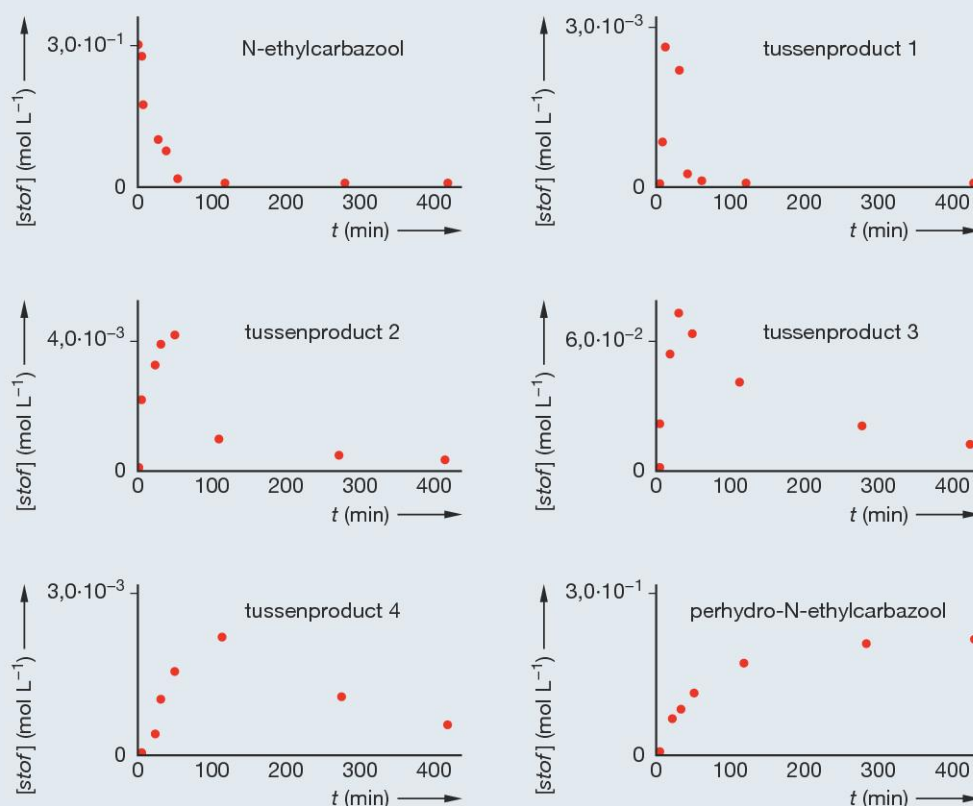
N-ethylcarbazool bindt waterstof door additie. Alle dubbele bindingen in N-ethylcarbazool worden hierbij omgezet tot enkelvoudige bindingen. Het product wordt perhydro-N-ethylcarbazool genoemd. De massa neemt hierbij minder dan 10% toe.

- b** Bereken met welk percentage van zijn oorspronkelijke massa de massa van N-ethylcarbazool toeneemt als alle dubbele bindingen in N-ethylcarbazool worden omgezet tot enkelvoudige bindingen. Geef je antwoord in twee significante cijfers.



15.50 Veilig opslaan van waterstof is nog niet zo gemakkelijk.

In een experiment is het verloop van de additie van waterstof aan N-ethylcarbazonol onderzocht. Het bleek dat in de loop van het experiment enkele tussenproducten konden worden aangetoond. Van de beginstof en het eindproduct en van een aantal tussenproducten is het verloop van de concentraties gemeten. In figuur 15.51 zijn enkele resultaten van de metingen weergegeven. De schaal op de y-assen verschilt per diagram. Het volume van het reactiemengsel was gedurende het gehele experiment constant.



15.51 Diagrammen van de omzetting van N-ethylcarbazonol

- c** Leg aan de hand van de diagrammen in figuur 15.51 uit of na 400 minuten een volledige omzetting tot perhydro-N-ethylcarbazonol is bereikt.

Uit de diagrammen kun je opmaken welke van de vijf weergegeven omzettingen de snelheidsbepalende stap is voor de omzetting van N-ethylcarbazonol tot perhydro-N-ethylcarbazonol.

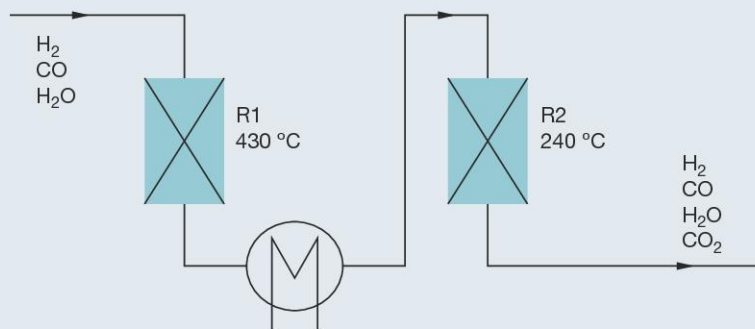
- d** Leg aan de hand van de diagrammen in figuur 15.51 uit welke omzetting de snelheidsbepalende stap is.

Naar: CE vwo 2017-I

7 Duurzame ammoniak

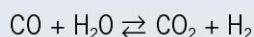
Ammoniak wordt in Europa vooral geproduceerd uit stikstof en methaan. Methaan treedt in het proces op als energiebron, maar ook als bron van waterstofatomen. Om waterstof te produceren uit methaan wordt bij hoge temperatuur en druk methaan in reactie gebracht met water en zuurstof. Hierbij wordt een gasmengsel van CO, H₂O en H₂ verkregen. Om een groot deel van het aanwezige CO te verwijderen wordt vervolgens in twee reactoren de zogeheten gas-shiftreactie uitgevoerd.

In figuur 15.52 is weergegeven hoe dit deel van het proces wordt uitgevoerd. Zowel in R1 als in R2 is een katalysator aanwezig en heerst een hoge druk.



15.52 Blokschema winning waterstof uit methaan

In beide reactoren treedt onderstaand evenwicht op:



In de gasstroom na R1 bedraagt het volumepercentage CO nog 2 tot 4% en na R2 is er nog 1% CO.

- Leg uit of de reactie naar rechts van dit evenwicht exotherm of endotherm is.
- Geef aan welk doel de hogere temperatuur in R1 heeft.

De waterstof afkomstig uit R2 wordt in een aantal stappen afgescheiden van de rest van het gasmengsel. Allereerst wordt water afgescheiden. Daarna wordt CO_2 gescheiden van de overige gassen.

- Leg uit op welke wijze je CO_2 kunt afscheiden uit het gasmengsel dat is ontstaan na het verwijderen van water uit het gasmengsel afkomstig van R2.

De gezuiverde waterstof wordt in een volgende reactor in reactie met stikstof gebracht. Het totaalproces van de productie van ammoniak uit onder andere methaan kun je weergeven met onderstaande reactievergelijking (reactie 1):



Als in een proces deze molverhoudingen worden toegepast, is het proces ongeveer energieneutraal. Dat betekent dat vrijwel geen extra energie nodig is of overtollige warmte ontstaat.

- Bereken de reactiewarmte van het totaalproces volgens reactie 1 per mol gevormde ammoniak. Neem aan dat H_2O in gasvorm aanwezig is. Rond bij deze berekening niet tussentijds af en geef je antwoord in twee significante cijfers.

In de praktijk blijkt dat de meest efficiënte ammoniakfabrieken 25% meer energie nodig hebben dan wat op basis van reactie 1 kan worden berekend. In het proces wordt dan ook 25% meer methaan per mol ammoniak gebruikt. De extra hoeveelheid methaan levert dan de benodigde energie.

- Geef de vergelijking van reactie 1 voor de praktijksituatie.

De waterstof die nodig is voor de productie van ammoniak kun je ook verkrijgen uit andere processen. In tabel 15.54 is het relatieve energieverbruik weergegeven voor de productie van waterstof uit een aantal grondstoffen.



15.53 Duurzame ammoniak voor de bereiding van duurzame kunstmest

In de reacties zijn de grondstoffen zware stookolie en nafta weergegeven met de gemiddelde verhouding tussen het aantal C-atomen en het aantal H-atomen in deze grondstoffen.

grondstof (proces)	reactie	relatief energieverbruik
kolen	$\text{C} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	170%
zware stookolie	$\text{CH} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2,5 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	135%
nafta	$\text{CH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	104%
aardgas	$\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	100%

15.54 Tabel relatief energieverbruik

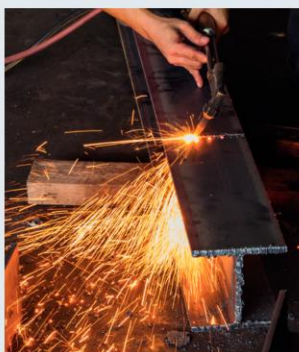
Zware stookolie en nafta zijn producten die afkomstig zijn van de destillatie van aardolie. Als onvoldoende aardgas beschikbaar is, kun je aan de hand van de tabel een afweging maken tussen de grondstoffen zware stookolie en nafta.

f Leg uit welke van de twee grondstoffen, zware stookolie of nafta, de voorkeur verdient voor de productie van waterstof. Geef twee argumenten op basis van tabel 15.54.

Naar: CE vwo 2016-II

8

Heet



15.55 Snijbrander met acetyleen

Voor het snijden van ijzeren voorwerpen zoals spoorrails of stalen platen worden snijbranders gebruikt. In een snijbrander wordt vrijwel altijd acetyleen (ethyn, C_2H_2) gebruikt in combinatie met zuivere zuurstof (figuur 15.55). Met deze ethyn-zuurstofvlam kan een vlamtemperatuur van ruim boven het smeltpunt van ijzer worden bereikt. Andere koolwaterstoffen zoals ethaan (C_2H_6) zijn onbruikbaar voor het snijden van ijzer door een te lage vlamtemperatuur.

De temperatuur die een vlam maximaal kan bereiken, hangt vooral af van twee factoren:

- de reactiewarmte van de verbranding van de brandstof;
- welke verbrandingsproducten ontstaan en in welke hoeveelheden.

Als wordt aangenomen dat ethyn volledig verbrandt, ontstaan koolstofdioxide en waterdamp. Wanneer verlies van energie naar de omgeving wordt verwaarloosd, wordt de vrijkomende energie uitsluitend gebruikt om koolstofdioxide en waterdamp te verwarmen. Met behulp van de reactiewarmte van de verbranding (de verbrandingswarmte) van ethyn en de soortelijke warmtes van koolstofdioxide en water kun je de temperatuurstijging van het gasmengsel berekenen. Bij volledige verbranding van ethyn zou de maximale temperatuur van de vlam boven $7 \cdot 10^3 \text{ K}$ liggen.

De soortelijke warmte van een stof is te definiëren als het aantal joule dat nodig is om 1 g stof 1 K in temperatuur te laten stijgen.

a Laat met een berekening zien dat bij volledige verbranding van ethyn een temperatuurstijging van meer dan $7 \cdot 10^3 \text{ K}$ wordt bereikt. Neem aan dat alle energie wordt gebruikt om de ontstane waterdamp en koolstofdioxide te verwarmen. Maak onder andere gebruik van de volgende gegevens:

- de verbrandingswarmte van ethyn waarbij water als waterdamp vrijkomt, bedraagt $-1,26 \cdot 10^6 \text{ J mol}^{-1}$;
- de soortelijke warmte van waterdamp bedraagt $2,8 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
- de soortelijke warmte van koolstofdioxidegas bedraagt $1,3 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Uit metingen blijkt dat bij de reactie van ethyn met zuurstof vooral koolstofmono-oxide en waterstof worden gevormd.

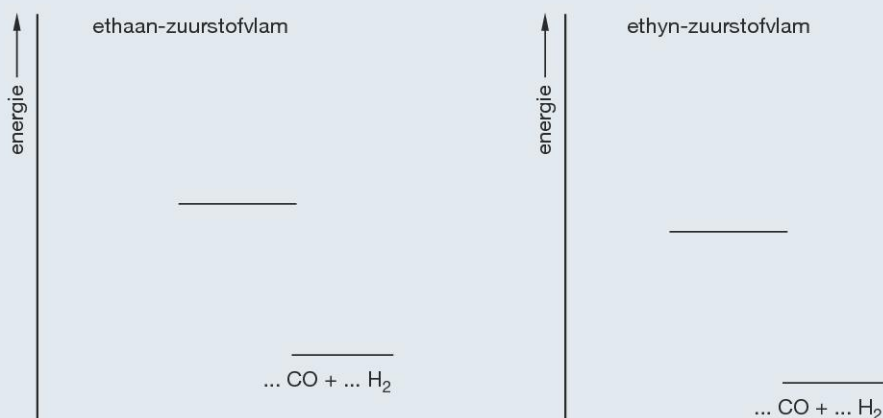
- b** Bereken de reactiewarmte per mol ethyn van de reactie waarbij ethyn met zuurstof reageert tot koolstofmono-oxide en waterstof. Gebruik Binas-tabel 57.

Op basis van de aanname dat de verbrandingsproducten van de ethyn-zuurstofvlam CO en H_2 zijn, kun je berekenen dat dan een temperatuurstijging van ruim $3 \cdot 10^3$ K wordt bereikt. De temperatuurstijging die kan worden bereikt met een ethaan-zuurstofvlam, waarbij ook CO en H_2 ontstaan, is lager dan van de ethyn-zuurstofvlam. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat bij de ethaan-zuurstofvlam meer mol gas moet worden verwarmd. Ook is de reactiewarmte lager. In figuur 15.56 zijn twee energiediagrammen weergegeven. Hierin zijn de energieniveaus van de niet-ontleedbare stoffen en de reactieproducten al aangegeven.

- c** Neem figuur 15.56 over in je schrift en maak de energiediagrammen voor beide reacties af zodat duidelijk wordt waarom de reactiewarmte van de ethaan-zuurstofvlam lager is dan die van de ethyn-zuurstofvlam.

Gebruik Binas tabel 57B. Geef in de diagrammen het volgende aan:

- de ontbrekende energieniveaus van de beginstoffen;
- de molecuulformules en coëfficiënten van de reacties.



15.56

Naar: CE vwo 2016-I

Keuzeopdrachten

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

1 De reactiesnelheid beïnvloeden

In deze opdracht voer je een aantal experimenten uit met een elektronisch meetprogramma zoals Coach of je rekenmachine. Je kunt de invloed van de concentratie en de temperatuur op de reactiesnelheid met behulp van een lichtsensor goed in kaart brengen.

2 Een geneesmiddel

Op de site vind je twee keuzeopdrachten over medicijnen. Een bijzondere procesindustrie!

Overzicht begrippen

Activeringsenergie

De hoeveelheid energie die nodig is om de reactietemperatuur te bereiken. De beginstoffen komen hierdoor in de **geactiveerde toestand**. De activeringsenergie wordt verlaagd door een **katalysator**.

Atoomeconomie

De atomeconomie geeft de efficiëntie van een reactie aan. De definitie is:

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

Batchproces

Als bij een proces steeds een afgeronde hoeveelheid product wordt gemaakt, heet dit een batchproces.

Blokschema

De processen in een chemische fabriek kun je weergeven in een eenvoudig blokschema. De blokken geven voorbewerking, reacties of scheidingsprocessen weer, de pijlen geven stofstromen weer. In het blokschema geef je ook het **recirculeren** van niet-gereageerde stoffen aan.

Chemische industrie

De meeste bedrijven in de chemische industrie houden zich bezig met de **bulkchemie**, het maken van enorme hoeveelheden van één product. Tot de **fijnchemie** horen onder andere farmaceutische bedrijven die vaak relatief kleine hoeveelheden van een stof maken.

Continuproces

Een proces waarbij een *voortdurende* aanvoer van beginstoffen en afvoer van reactieproducten is.

E-factor

De E-factor is de hoeveelheid afval per kg product en wordt gegeven door de volgende

formule: $E = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$. De **Q-factor** geeft de mate aan waarin een stof vervuילend is.

Grenswaarde

De grenswaarde is de maximaal toegestane hoeveelheid van een stof in mg per m³ lucht op de werkplek en kan ook worden gegeven in ppb, ppm, procent of promille.

$$\text{Grenswaarde in ppb} = \frac{\text{hoeveelheid stof X}}{\text{hoeveelheid mengsel}} \times 10^9 \text{ ppb}$$

Groene chemie

Groene chemie is het toepassen van duurzame ontwikkelingen in de chemische industrie. De productieprocessen zijn gebaseerd op de principes van groene chemie.

Reactie-energie of reactiewarmte

Elke reactie heeft een **energie-effect**, de reactie is **exotherm** of **endotherm**.

De hoeveelheid energie die vrijkomt bij een reactie of nodig is voor een reactie, is: $\Delta E = E_{\text{reactieproducten}} - E_{\text{beginstoffen}}$. Bij alle processen geldt dat de totale hoeveelheid energie constant blijft, dit is de **energiebalans**.

Reactiesnelheid

Het aantal mol stof of het aantal mol deeltjes dat per seconde ontstaat of verdwijnt in een volume van één liter. De eenheid is dus mol L⁻¹ s⁻¹.

Vormingswarmte

De vormingswarmte is de energie die nodig is of vrijkomt bij de vorming van één mol stof uit de elementen.

Register

Symbolen

1,2-additie 174
1,4-additie 174

A

aangeslagen toestand 76
absorptiespectrum 76
additiepolymerisatie 194
additiereactie 173
amide 202
amidebinding 203
anorganische zuren 20
asymmetrisch C-atoom 180
atoomrooster 238
austeniet 226

B

base 40
baseconstante 52
basisch 8
batchproces 279
bindend elektronenpaar 153
blanco 86
blokschema 278
bros 226
brosheid 238
buigvibratie 79
bulkchemie 277

C

chromatogram 91
colorimetrie 81
composiet 233, 238
condensatiepolymeren 201
condensatiepolymerisatie 194, 200
condensatiereactie 200, 201
continuproces 279
copolymeer 202
corrosie 223
covalentie 152
crosslinks 208

D

dipolen 162
dipool-dipoolbinding 162
duurzaamheid 258

E

edelgasconfiguratie 152
edelheid van metalen 123, 223
E-factor 259
elektrofiel 172
elektronenpaar 152
emissiespectrum 76
energiebalans 265
energie-effect 265
equivalentiepunt 62
extinctie 86

F

fijnchemie 277
formele lading 156
fotonen 75

G

gaschromatografie 93
geconjugeerde oxidator 124
geconjugeerde reductor 124
geconjugeerd systeem 233
geconjugeerd zuur-basepaar 41
geheugenmetaal 226
geleidend polymeer 232
gemiddelde ketenlengte 209
gemiddelde molecuulmassa 209
golflengte 74
grenswaarde 261
groene chemie 258
grondtoestand 76

H

halfreactie 117
hardheid 238
hydrolysereacties 201

I

ijklijn 86
ijkreeks 86
indicatoren 8
initiatie 172, 173
instabiele zuren 20
insteltijd, t_1 273
ionair mechanisme 171
ionrooster 239

ir-spectroscopie 79
isomeren 178

K

katalysator 274
kernfusiereactie 222
kwalitatieve analyse 79
kwantitatieve analyse 81, 85

L

lakmoes 9
legeringen 225
lewisstructuur 152
lichtgevende polymeren 232
loopvloeistof 91

M

macroniveau 199
martensiet 226
massaspectrometer 99
massaspectrometrie 99
massaspectrum 99, 100
meerwaardige basen 45
meerwaardige zuren 19
meerwaardige zwakke base 44
mesomerie 166
mesoniveau 199, 224
metaalbinding 224
microniveau 199
mobiele fase 91
monomeereenheid 195
monomeren 194
monster 85

N

nanotechnologie 244
netwerkpolymeer 208
neutraal 8
niet-bindende 153
nucleofiel 172

O

octetregel 152
omringingsgetal 161
omslagtraject 9, 62
organische zuren 19

oxidator 117
oxoniumion 13

P

papierchromatografie 91
partiële lading 160
pOH 50
polaire atoombinding 160
polyamiden 202
polyester 202
polymeren 194
polymerisatiegraad 209
ppb 261
propagatie 172, 173

R

radicaal 100, 155
radicaalmechanisme 171
reactiemechanisme 171
reactiesnelheid 271
reactiewarmte 265
recirculeren 278
redoxkoppel 124
redoxreactie 116
redoxtitraties 138
reductor 117
rendement 259
retentietijd 93
Rf-waarde 91
roosterfouten 225

S

significante cijfers 25
spectrofotometer 85
spectroscopie 75
spectrum 75
spiegelbeeldisomeren 180
standaardelektrodepotentiaal 124, 223
standaardoplossingen 86
stappenplan halfreactie 132
stappenplan redoxreactie 125
stationaire fase 91
stereo-isomeren 179
sterke base 41
sterke zuren 14
strekvibratie 79
structuurisomeren 178
substitutiereactie 171
systematische fout 64

T

terminatie 172, 173
TGG 261
thermoharders 207
thermoplasten 207
TLC 92
toevallige fout 64
totaalreactie 117

U

uitgebreid octet 154
universeel indicatorpapier 9
uv-stabilisator 211
uv-straling 210
uv/VIS-spectroscopie 81

V

valentie-elektronen 152
vanderwaalsbinding 161
vervuilingsfactor Q 260
vloeistofchromatografie 93
vormingswarmte 266
vrije elektronenparen 153

W

waterconstante 51
waterevenwicht 50
waterstofbrug 161
weekmakers 209
wet van behoud van energie 265

Z

zuur 8
zuur-basereactie 56
zuur-basetitratie 62
zuurconstante 26
zuurgraad 8
zuurrestion 19
zwakke base 41
zwakke zuren 14

Verantwoording

Fotoresearch: Fotoredactie, Arnhem

- Belga/ANP, Rijswijk: p. 6-7
 Bart van Overbeeke Fotografie, Eindhoven: p. 8(b)
 Alamy/Image Select, Wassenaar: p. 8(o), 17, 57(b), 76, 98, 118(l), 123(m), 154(b), 170, 189(b), 224(b,o), 278(o)
 Ben Mills/University of Bristol, Bristol: p. 9
 Christian Hummert, Thuringen: p. 10
 TUNS/Lineair, Arnhem: p. 11
 Juan-Carlos Muñoz/Lineair, Arnhem: p. 13
 O. Diez/Lineair, Arnhem: p. 15(b)
 iStock, Dublin: p. 15(o), 24(b), 25(b), 38-39, 41(b), 43(b,o), 44(b), 45(b,o), 47(l), 48, 51(b), 52(b), 53(l), 55, 62(b), 65(r), 69, 72-73, 75, 77, 79, 80(o), 82(b,o), 88(l), 101, 102(b), 103, 108, 109, 114-115, 116(b), 118(r), 124(m,o), 126, 133(o), 137, 141, 144, 145(o), 148, 150-151, 152(b), 154(o), 155(o), 156(b,o), 159, 160(b), 171(o), 173, 174, 175, 182, 186(o), 187, 190, 194(o), 195, 196, 203(b), 207(o), 209, 215(o), 238(b,or), 244(b,m), 252, 253, 254, 259(o), 261(b), 262, 271(o), 279(b), 289, 291, 292, 293
 AFP/ANP, Rijswijk: p. 18, 230(o), 256-257, 269
 Walter G. Allgöwer/Lineair, Arnhem: p. 19
 Gamma/ANP, Rijswijk: p. 20(b)
 Collectie Lineair, Arnhem: p. 20(o)
 Roeland Koning, Amstelveen: p. 21(l)
 Cultura Images/HH, Den Haag: p. 21(r)
 Erik van der Burgt/HH, Den Haag: p. 24(o)
 The Johnlner/ Davenport Laboratories, Toronto: p. 25(o)
 Shutterstock, New York: p. 27, 28, 34, 93, 160(o), 166(b), 203(o), 265(o), 267(o), 284(b)
 Anders L. Damgaard, Copenhagen: p. 29
 AP/Greepeace/HH, Den Haag: p. 31
 Zeeuws Archief, Middelburg: p. 32
 Ron Giling/Lineair, Arnhem: p. 36(b, o), 52(o), 59(b), 62(o), 63(b), 64(b,o), 83, 85, 90, 91(o), 94, 117(o), 118(b), 130(o), 131, 132(o), 138(b), 166(o), 186(b), 210(b,m), 217, 226, 230(b), 232(m), 261(o)
 Parco Archeologico, Pompei: p. 40(b)
 Sjef Buil, Zwaag: p. 40(o), 54, 61
 Picture-Alliance/Lineair: p. 41(o), 50(b), 59(o), 91(b), 127(l), 146(o), 185, 192-193, 199(b), 202(o), 210(o), 216, 231, 261(m), 279(o)
 F. Lamiot, Lille: p. 44(o)
 Arjan Boer/Media-totaal: p. 46
 CHINATOPIX/ Reporters/Lineair: p. 47(r)
 H. Rigel/Bios/Lineair, Arnhem: p. 49(b)
 Nurul Iman Supardi, Benkulu-Indonesie: p. 49(o)
 Buiten-Beeld/HH, Den Haag: p. 50(o)
 Qingdao Tongkai castor chemical, Chengdu: p. 51(o)
 Harrie van Leeuwen/Veeteelt, Arnhem: p. 53(r)
 Marc Bolsius, Den Bosch: p. 56(b)
 Richard Hagendoorn, Oostvoorne: p. 56(o)
 YouTube / Nikolai Bearded: p. 57(o)
 Andre Maslennikov/Lineair, Arnhem: p. 58
 BrandTech, Bochum: p. 63(o)
 Ullsteinbild/Lineair, Arnhem: p. 65(l)
 United Launch Alliance, Centennial: p. 68
 NASA, Washington: p. 74, 155(b), 189(o)
 OPALCO Energy Savings, Eastsound: p. 80(b)
 Tom Heutmekers: p. 86(b), 87
 A.Giamberardino/Carleton University, Ontario: p. 86(o)
 Institut d'optique d'Aquitaine, Talence: p. 88(r)
 Mcbort, London: p. 95
 Angel Barbosa/Smithsonian, Washington: p. 99(b)
 Toronto Star/Getty Images, Dublin: p. 99(o)
 Javier Larrea/ AGE fotostock, Barcelona: p. 102(o)
 Lonely Planet Images/Getty Images, Dublin: p. 104
 Wilfried Bahn Müller/Lineair, Arnhem: p. 112
 Periodic Video/University of Nottingham: p. 116(o)
 SPL/ANP, Rijswijk: p. 117(b), 132(b), 199(o), 272(o,b), 277(o)
 David Allan/Department of Chemistry, University of Hull: p. 119
 National Academy of Sciences, Washington: p. 120
 Hans Splinter, Alphen ad Rijn: p. 123(b)
 Earth Sciences Museum, Waterloo: p. 123(o)
 The Royal Institution, Londen: p. 124(b)
 Michael Jepkes, Breda: p. 125
 Frank Valli, Washington: p. 127(r)
 Reuters/ANP, Rijswijk: p. 128
 Universiteit Tel Aviv: p. 130(b)
 Heinrich Pniok, Hamburg: p. 133(b)
 Care Foundation UK, Londen: p. 135
 Alfakem, Athene: p. 138(o)
 Bart van Overbeeke, Delft: p. 139
 ESA, Parijs: p. 145(b)
 Adrian Cowell/Lineair: p. 146(b)
 WaterFrame/AGE, Barcelona: p. 147
 BISA, Ukkel: p. 152(o)
 Telsen, Delson: p. 153
 Andrzej Sygula, American Chemical Society, Washington: p. 163(b)
 Petr Král/University of Illinois, Chicago: p. 163(o)

- Mark Sheley/Lineair, Arnhem: p. 168(b)
 Elisa Azzali, Damascus: p. 168(o)
 Sports Illustrated/Getty Images, Dublin: p. 171(b)
 Heinrich Pniok, Hamburg: p. 172(b,o)
 Bericht der Deutsche Chemie, Berlijn: p. 177
 Oxford Scientific/Getty Images, Dublin: p. 178
 R. Koenig/Lineair, Arnhem: p. 180
 Productschap Akkerbouw, Zoetermeer: p. 188
 Alexandre Macieira/VemProRio, Rio de Janeiro: p. 194(b)
 Polaris/HH, Den Haag: p. 197
 Debbie Glover/DIY, Liverpool: p. 198
 Eyevin/HH, Den Haag: p. 200
 Peter Oldshavsky/University of Nebraska, Lincoln: p. 201(b)
 Garth Britzman//University of Nebraska, Lincoln: p. 201(o)
 Michal Cihlar/Veronika Richterova, Bustehrad: p. 202(b)
 Martijn Swinkels/Merel Rozendaal/HVA, Amsterdam:
 p. 204(l)
 Royal Society of Chemistry, Cambridge: p. 204(r)
 Gerard van Bree/Lineair, Arnhem: p. 207(b)
 Carlin Leslie/US Air Force, Washington: p. 212
 Aaron Summerfield/RM Auctions, New York: p. 213
 Mondadori/Getty Images, Dublin: ip. 214
 i2c-World, Summerfield: p. 215(b)
 Melanie Gonick/MIT, Cambridge, MA: p. 220-221
 ITER Organization, Cadarache: p. 222
 Nic Edis/Finlandguide, Nespoo: p. 223
 Edward Pleshakov, Lviv: p. 225(b)
 Mostafa Steel Galvanizing, Agrabad: p. 225(o)
 FOM-Institute/ Differ, Nieuwegein: p. 227
 LG, Seoel: p. 232(b)
 E-Cubed Ventures, Boston: p. 232(o)
 InfinityPV, Jyllinge: p. 233
 Richard Megna/FPhoto, New York: p. 234
 Robert Seitz/Lineair, Arnhem: p. 237(b)
 Manuscript of the Dunois Master, Rome: p. 237(o)
 Evert Elzinga/Hermitage, Amsterdam: p. 238(m)
 Alibaba, Hangzhou: p. 238(ol)
 Vroom Funderingstechnieken, Oosthuizen: p. 240(b)
 Mario Hösel/Lineair, Arnhem: p. 240(o)
 Alaric Taylor/UCL, Londen: p. 244(o)
 Omicron Technology, Isle of Man: p. 245(b)
 Lawrence Berkeley National Laboratory, San Fransisco:
 p. 245(m,o)
 Wim Noorduyn/Amolf, Amsterdam: p. 246(l,r)
 Institute of Robotics and Intelligent Systems ETH, Zurich:
 p. 248(b)
 Lixiao/University of South Carolina, Columbia: p. 248(o)
 Berlinda van Dam/HH, Den Haag: p. 251
 Wouter Hagens, Dordrecht: p. 258
 Russian Copper Company, Ekatarinburg: 259(b)
 Evan Amos, New York: p. 260
 Van Nicholas Boreas, Heerenveen: p. 264
 Panda Green Energy, Hongkong: p. 265(b)
 Koen Suyk /ANP, Rijswijk: p. 267(b)
 Kees van de Veen/HH, Den Haag: p. 267(m)
 Robin Utrecht /HH, Den Haag: p. 268
 Helmut Meyer/Getty Images, Dublin: p. 271(b)
 Siebe Swart/HH, Den Haag: p. 277(b)
 Michiel Wijnbergh/HH, Den Haag: p. 278(b)
 Bram van Risp, Rotterdam: p. 280
 Emil Langvad/Ianberry.art, Londen: p. 283(b)
 David Rozing/HH, Den Haag: p. 283(o)
 Covestro, Leverkusen: p. 284(o)
 Mark Shenley/Lineair: p. 285(b)
 Mischa Keijser/Getty Images, Dublin: p. 285(o)
 Look/Getty Images, Dublin: p. 290



Bij dit boek hoort een digitale leeromgeving met interactieve opdrachten in diverse leerroutes, overzichtelijke dashboards en een uitgebreide toetsmodule. Dit maakt gepersonaliseerd leren mogelijk.



Noordhoff Uitgevers



www.chemieoveral.noordhoff.nl

ISBN 978-90-01-81976-7



9 789001 819767