

# WETENSCHAP IS GEEN MENING



**KLIMAAT,  
ENERGIE EN STIKSTOF  
UITGELEGD**

**Roel Grit**

**Noordhoff  
Business**



**Wetenschap is geen mening**

**Klimaat, energie en  
stikstof uitgelegd**

*Ontwerp omslag en binnenwerk:*

Jelle F. Post, Groningen

*Omslagbeeld:* Getty Images

0 / 22

© 2022 Noordhoff Uitgevers bv, Groningen/  
Utrecht, Nederland

Eventuele op- en aanmerkingen over deze of andere uitgaven kunt u richten aan: Noordhoff Uitgevers bv, Afdeling Hoger Onderwijs, Antwoordnummer 13, 9700 vB Groningen of via het contactformulier op [www.mijnnoordhoff.nl](http://www.mijnnoordhoff.nl)

Deze uitgave is beschermd op grond van het auteursrecht. Wanneer u (her)gebruik wilt maken van de informatie in deze uitgave, dient u vooraf schriftelijke toestemming te verkrijgen van Noordhoff Uitgevers bv.

*De informatie in deze uitgave is uitsluitend bedoeld als algemene informatie. Aan deze informatie kunt u geen rechten of aansprakelijkheid van de auteur(s), redactie of uitgever ontleen.*

*This publication is protected by copyright. Prior written permission of Noordhoff Uitgevers bv is required to (re)use the information in this publication.*

ISBN (ebook) 978-90-01-01093-5

ISBN 978-90-01-01090-4



# WETENSCHAP IS GEEN MENING

KLIMAAT,  
ENERGIE EN STIKSTOF  
UITGELEGD

Roel Grit

Noordhoff  
Groningen/Utrecht

# Inhoud

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lees dit eerst</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1 Natuurwetenschap is overal</b>                                 | <b>16</b> |
| Alles bestaat uit atomen en moleculen                               | 18        |
| Beperkt aantal atoomsoorten (elementen)                             | 20        |
| Belangrijke moleculen in dit boek                                   | 21        |
| Chemische reacties: moleculen 'doen' het met elkaar                 | 24        |
| Ons leven tussen gassen   | 28        |
| Opwarming van de aarde en temperatuur                               | 29        |
| Materie in verschijningsvormen                                      | 31        |
| Licht is elektromagnetische straling                                | 36        |
| <b>2 Stikstofprobleem een luxe probleem?</b>                        | <b>40</b> |
| Luchtstikstof is niet reactief                                      | 41        |
| Stikstofverbindingen zijn wel reactief                              | 42        |
| Waarvoor heb je stikstof nodig?                                     | 42        |
| Hoe komen stikstofverbindingen in de bodem?                         | 43        |
| Uitstoot van ammoniak $\text{NH}_3$ en stikstofoxiden $\text{NO}_x$ | 49        |
| Sojabonen   | 51        |
| Intensieve landbouw   | 52        |
| Politiek en Natura 2000   | 53        |
| <b>3 Wereldwijd energieprobleem</b>                                 | <b>58</b> |
| Energie   | 60        |
| Energie meten   | 60        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
|          | Potentiële energie en kinetische energie            | 61         |
|          | Wet van behoud van energie                          | 61         |
|          | Energie in voeding                                  | 62         |
|          | Je energierekening                                  | 63         |
|          | Vermogen is per seconde                             | 65         |
|          | Geleverd elektrisch vermogen                        | 66         |
|          | Vormen van energie                                  | 67         |
|          | Energiebron en energiedrager                        | 69         |
|          | Energieverbruik Nederland                           | 70         |
|          | Hoeveel energie kost de productie van energie?      | 72         |
| <b>4</b> | <b>Fossiele brandstoffen</b>                        | <b>80</b>  |
|          | Steenkool   | 81         |
|          | Aardgas   | 85         |
|          | Aardolie  | 90         |
|          | Uitstoot CO <sub>2</sub> door fossiele brandstoffen | 94         |
| <b>5</b> | <b>Opwarming van de aarde</b>                       | <b>96</b>  |
|          | Broeikasgassen en het broeikaseffect                | 97         |
|          | Toename van het CO <sub>2</sub> -gehalte            | 99         |
|          | Temperatuurverloop op aarde                         | 103        |
|          | Kantelpunten en opslingereffecten                   | 104        |
|          | Gevolgen van opwarming                              | 108        |
|          | Broeikasgassen in Nederland                         | 111        |
|          | De Europese Green Deal                              | 114        |
|          | Maatschappelijke invloed en onrust                  | 117        |
|          | Klimaatsceptici                                     | 120        |
|          | Het IPCC-klimaatpanel van de VN                     | 122        |
|          | KNMI Klimaatsignaal '21                             | 124        |
| <b>6</b> | <b>Elektriciteit, een schone energiebron</b>        | <b>126</b> |
|          | Moleculen en atomen                                 | 127        |
|          | Stroom van elektronen                               | 128        |
|          | Stroomkring   | 129        |

|          |                                       |            |
|----------|---------------------------------------|------------|
|          | Wisselspanning en gelijkspanning      | 130        |
|          | Beveiliging                           | 132        |
|          | Elektriciteitscentrales               | 133        |
|          | Elektriciteit in Nederland            | 136        |
|          | Tijdelijke opslag van energie         | 138        |
|          | Toekomstige accubeloftes              | 142        |
|          | Rekenen met elektriciteit             | 144        |
| <b>7</b> | <b>Duurzame energie</b>               | <b>148</b> |
|          | Windenergie                           | 149        |
|          | Zonne-energie                         | 157        |
|          | Verschil in vraag en aanbod           | 160        |
|          | Afstemmen van vraag en aanbod         | 162        |
|          | Biomassa en biobrandstoffen           | 164        |
|          | Aardwarmte                            | 167        |
|          | Buitenluchtwarmte                     | 168        |
|          | Is kernenergie duurzaam?              | 169        |
| <b>8</b> | <b>Waterstofeconomie</b>              | <b>170</b> |
|          | Wat is waterstof?                     | 171        |
|          | Grijs, blauw en groen waterstofgas    | 173        |
|          | Toepassingen van waterstof            | 180        |
|          | Elektrische auto's                    | 182        |
|          | Enkele ontwikkelingen                 | 185        |
|          | IJzerproductie met waterstof?         | 186        |
| <b>9</b> | <b>Kernenergie</b>                    | <b>190</b> |
|          | Een mens loopt op kernenergie         | 192        |
|          | Opbouw van atomen                     | 193        |
|          | Kernenergie                           | 195        |
|          | Verdwijnende massa en Einstein        | 196        |
|          | Verschillende isotopen van uranium    | 198        |
|          | De helft is verdwenen: halveringstijd | 199        |
|          | Kettingreacties bij kernsplijting     | 199        |



|   |                                       |            |
|---|---------------------------------------|------------|
|   | Kritische massa en de atoombom        | 200        |
|   | Kernenergie in Nederland              | 201        |
|   | Kernenergie wereldwijd                | 202        |
|   | Kerncentrales met kernsplijting       | 203        |
|   | Voor- en nadelen van kernenergie      | 204        |
|   | Radioactiviteit en gezondheid         | 206        |
|   | Radioactief afval                     | 207        |
|   | Kernfusiereactie                      | 207        |
|   | Kerncentrale op thorium               | 209        |
|   | Waarom uranium in plaats van thorium? | 211        |
|   | Small Modular Reactors                | 211        |
| <b>10</b>   | <b>Voeding</b>                        | <b>214</b> |
|   | Gezonde voeding                       | 215        |
|   | Koolhydraten ('suikers')              | 217        |
|   | Vetten en oliën                       | 223        |
|   | Eiwitten                              | 224        |
|   | Mineralen                             | 229        |
|   | Alcohol                               | 230        |
|   | Water                                 | 232        |
|   | Energie in voeding                    | 233        |
|   | E-nummers                             | 234        |
|  | <b>Nawoord</b>                        | <b>236</b> |
|  | <b>Geraadpleegde bronnen</b>          | <b>241</b> |
|  | <b>Illustratieverantwoording</b>      | <b>248</b> |
|  | <b>Register</b>                       | <b>249</b> |

**Voor mijn kleinkinderen  
Otto en Jiska Modderman  
en alle andere kleinkinderen**

---

## Lees dit eerst

**E**en politicus in de Tweede Kamer maakte tijdens een tv-uitzending in het voorbijgaan een opmerking waar ik als natuurwetenschapper van schrok. Het bleek dat voor hem de opwarming van onze aarde hetzelfde was als de stikstofcrisis waarin Nederland momenteel verkeert. De opwarming van de aarde is een wereldprobleem, terwijl de stikstofcrisis vooral een Nederlands probleem is. De opwarming van de aarde – en de bijbehorende energiecrisis – kan uitlopen op een catastrofe, maar ons stikstofprobleem is lokaal.

Als je van een onderwerp niets weet is dat op zich niet erg, als je dat zelf maar doorhebt, zodat je advies kunt vragen aan de juiste mensen, deskundige mensen zonder een commercieel of zakelijk belang.

Veel belangrijke hedendaagse wereldproblemen hebben te maken met menselijk handelen. Denk aan de opwarming van de aarde, de stikstofcrisis, luchtvervuiling, voedselschaarste en de energiecrisis. Om deze problemen te begrijpen, heb je kennis uit de *natuurwetenschappen* nodig.

Dit boek levert inzichten om kritisch mee te kunnen denken over hedendaagse problemen met een natuurwetenschappelijke achtergrond. Hierbij wordt gebruik gemaakt van beginselen van de natuurkunde, scheikunde en biologie.

### Voor wie is dit boek?

Dit boek is geschreven voor politici, geïnteresseerde kiezers en krantlezers en journalisten. Primair voor politici als beslissers, maar ook voor burgers, omdat zij in staat moeten zijn ‘goede’ vertegenwoordigers te kiezen. En omdat de communicatie tussen de politiek en de burger verzorgd wordt door de pers, is het boek zeker ook voor de niet gespecialiseerde journalist.

### **Wat vind je in dit boek?**

Dit boek biedt een natuurwetenschappelijke invalshoek voor enkele politieke problemen die veel in het nieuws zijn en waarover veel wordt gesproken, maar niet altijd met kennis van zaken.

Per onderwerp wordt uitgelegd hoe het natuurwetenschappelijk in elkaar steekt. Na een korte inleiding over natuur- en scheikundige principes gaat dit boek over het Nederlandse stikstofprobleem en de opwarming van de aarde. Aangezien dit alles met ons energieprobleem te maken heeft, passeren verschillende energiebronnen de revue zoals fossiele energie, windenergie en zonne-energie. Ook is aandacht voor energiebronnen als kernenergie en kernfusie-energie. Kritische kanttekeningen zijn er bij de opslag van energie in energiedragers, zoals de waterstofeconomie, het gebruik van (lithium)accu's en energie uit biomassa. Omdat elektriciteit een schone manier is om energie te transporteren, is daar ook een hoofdstuk over geschreven. En ook voedsel komt aan de orde, omdat dit ons als mens energie levert.

### **Waarom is dit boek geschreven?**

Politici die voor en namens ons beslissen moeten wel weten waar ze het over hebben. De burger moet begrijpen wat zijn vertegenwoordigers bedoelen. En de pers moet daar verstandig en vooral begrijpelijk over berichten.

### **Weet wat je niet weet!**

Ik realiseerde me door de gemaakte opmerking van de politicus dat deze beroepsgroep vooral uit de economische, juridische en bestuurskundige hoek komt. Velen van hen hebben vakken als scheikunde, natuurkunde en biologie in hun vooropleiding laten vallen. Weinig politici zijn bèta's met een exacte achtergrond. En dat terwijl veel grote problemen van nu hier mee te maken hebben. Niet alleen de opwarming van de aarde, de energie- en stikstofcrisis maar ook (beveiligings)problemen in computernetwerken en cybercrime via het internet. Het valt ook niet mee: je moet als politicus maar overal verstand van hebben en overal over mee kunnen praten!

Een politicus moet wel weten wat hij niet weet en niet bluffen. Helaas wordt in de politiek van mening veranderen vaak gezien als een blamage en niet als een bewijs van voortschrijdend inzicht. Als een politicus van mening verandert, gebruiken journalisten graag het onsympathieke woord 'draaien'. Een uitstekende econoom, historicus of jurist is vaak

niet deskundig op natuurwetenschappelijke gebied. Dat hoeft ook niet! Maar politici moeten wel kritische vragen kunnen stellen en zich daarbij laten informeren door onafhankelijke wetenschappers en dus niet door belanghebbende lobbyisten.

Het opleidingsniveau van de Tweede Kamerleden is hoog. In 2017 hadden 94 leden een academische opleiding gevolgd en waren er 31 op hbo-niveau afgestudeerd. Veelvoorkomende specialisaties waren in 2017: juridisch (26 leden), economisch (17), politicologie (15), bestuurskundig (11) en historici (10). Slechts vijf leden hadden een bèta-achtergrond en er zat geen medicus in de Tweede Kamer. Overigens hebben ook veel journalisten een alfa-achtergrond. Hebben kranten vaak een wetenschapsredacteur en een wetenschapsbijlage, onder parlementaire verslaggevers lijkt die specialisatie er niet te zijn.

In Den Haag lopen op het Binnenhof veel *lobbyisten* rond. Vaak zijn dit oud-politici of slimme en sociaalvaardige deskundigen die directe toegang hebben tot bestuurders en in dienst zijn van belangengroepen uit bijvoorbeeld landbouw, wegenbouw, gezondheidszorg en olie-industrie. Beslissers – zoals ministers, Kamerleden en hoge ambtenaren – laten zich adviseren door lobbyisten uit bijvoorbeeld de olie-industrie, die door haar investeringen vaak belang heeft bij het handhaven van de huidige situatie.

### **De economie moet groeien, toch?**

Economen vinden al jaren dat de economie moet groeien, maar een alsmaar groeiende economie en wereldbevolking gaan niet samen met klimaat- en milieudoelstellingen. We bezuinigen op energie, maar door de groeiende economie stijgt onze energieconsumptie sneller, dan we besparen. En China, India en Afrika gaan hun deel van de welvaart nog opeisen! Die groei kan alleen als we over gemakkelijk te produceren schone energie kunnen beschikken om producten te maken en voedsel te verbouwen.

### **Kritische vragen**

Ik ben geen klimaatactivist of aandeelhouder van een bedrijf, maar een ongebonden scheikundige/natuurkundige. Ik heb geprobeerd dit boek te schrijven zonder dogma's. Zo komt ook de door sommigen verguisde kernenergie aan de orde en is er aandacht voor nadelen van alternatieve energiebronnen. Ik probeer in de tekst kritische opmerkingen te maken, maar ook vragen te stellen. Vragen die tot nadenken moeten stemmen,

maar ook vragen waarop ik het antwoord vaak zelf niet weet, omdat vele technieken en hun voor- en nadelen nu eenmaal zeer complex kunnen zijn.

Een paar voorbeelden van mogelijke vragen:

- Met *subsidies* kun je elk energieproject financieel 'rendabel' maken. Echter de belangrijkste vraag is: levert een energieproject netto energie onder de streep op? Komt er meer energie uit dan er gedurende de gehele levensduur ingestopt wordt, inclusief materialen, opbouw, onderhoud, transport en afbraak? Eigenlijk is dit de hamvraag. In hoofdstuk 3 geeft het begrip *EROI* hier een antwoord op.
- Kunnen we waterstof gebruiken in plaats van aardgas? Levert 'grijs' waterstof een bijdrage aan de oplossing van het klimaatprobleem?
- Zijn biomassacentrales, houtpallet gestookte centrales, palmolie gestookte dieselmotoren hypes of leveren ze een werkelijke bijdrage aan de energievoorziening?
- Zijn er voldoende winbare, bijzondere metalen beschikbaar voor de benodigde elektronica en apparatuur voor de energietransitie?
- Met welke snelheid kunnen geschikte batterijen worden ontwikkeld? Bestaat de superbatterij?
- Zijn gesmolten zoutkerncentrales op basis van thorium een veilig alternatief voor uraniumcentrales?
- Is kernfusie-energie een reële alternatieve energiebron?
- Gaat het opbergen van broeikasgassen in zoutlagen of lege gasvelden onder de grond werken of ontsnapt het uiteindelijk gewoon weer?
- Welke milieuproblemen krijgen we als we over twintig jaar alle huidige zonnepanelen en windmolens moeten opruimen of vervangen?
- Zijn traditionele oliemaatschappijen in staat de energieproblemen op te lossen? Of moeten we onze hoop vestigen op technologiebedrijven?
- Wat geeft een bedrijf het recht schone lucht te vervuilen? Is een schoon milieu een grondrecht?
- En over opwarming van de aarde gesproken: hoe erg is het als uiteindelijk Amersfoort aan zee ligt?

Bij de onderwerpen over energie heb ik de achtergronden geschetst van ons energieprobleem. Wat buiten het bestek valt van dit boek is *energiebezuiniging*. Dat is iets waar je zelf iets aan kunt doen door korter te douchen, minder licht aan te doen in huis, verwarming een graadje lager te zetten, niet of minder met het vliegtuig op vakantie, enzovoort.

### **Gebruik en aanmoediging voor de lezer**

Misschien heb je vakken als natuurkunde en scheikunde op de middelbare school laten vallen. Een verkeerde start in deze vakken blijft je achtervolgen. Misschien vond je het vreemde en abstracte vakken, was het onrustig in de klas of speelden je hormonen op. Als je op de middelbare school natuurkunde en scheikunde hebt laten vallen: nu je ouder bent is het waarschijnlijk gemakkelijker. Ben je bekend met de inhoud van een hoofdstuk, dan kun je het natuurlijk overslaan.

Ik heb geprobeerd een samenhangende, logische uitleg te geven van natuurwetenschappelijke begrippen die je – als politicus, journalist en burger – achtergrondinformatie geven bij het stellen van de juiste vragen. Ik heb dat – ondanks dat ik wat haast had vanwege mijn gezondheid – zo zorgvuldig mogelijk gedaan.

### **Verantwoording**

De gegevens in dit boek zijn verkregen via diverse bronnen, zoals het CBS, het IPCC, het KNMI, het Voedingscentrum en het Wereld Natuurfonds. Bij het gebruik van elke bron moet je je realiseren wat het belang is van de leverancier van de informatie. Commerciële oliemaatschappijen, maar ook milieuorganisaties hebben een eigen belang en zullen hun informatie meestal gunstig voorstellen. Verder hangen de verstrekte onderzoeksresultaten in bronnen vaak af van de precieze definitie van een gebruikt begrip. Daarom moeten de gegevens in dit boek worden gezien als orde van grootte of als aanduiding van een trend. Omdat tijdens de coronapandemie de economie op een veel lager pitje draaide, zijn veel gebruikte cijfers in dit boek afkomstig uit het jaar 2019, dus vóór de coronacrisis. Eind 2021 was volgens het CPB de economie terug op het niveau van voor de coronacrisis. Om de leesbaarheid te behouden voor de doelgroep van dit boek is de uitleg niet altijd volledig.

## Dankwoord

Ik wil graag een aantal personen bedanken.

- Dank aan mijn goede vriend Willem Bakker. Hij rondde een universitaire studie af zonder in zijn schoolloopbaan ooit het vak scheikunde tegen te komen. Hij was – met zijn taalvaardigheid en analytisch vermogen – bij uitstek geschikt om de uitleg in dit boek op begrijpelijkheid, volledigheid en leesbaarheid te controleren.
- Dank aan mijn oude schoolvriend, scheikundige en stralingsdeskundige Simon van Dullemen.
- Dank aan mijn vrouw Dia Grit voor het kritisch lezen van het manuscript, haar uitstekende suggesties en haar niet-aflatende enthousiasme voor dit project.
- Dank aan mijn dochter Saskia Grit voor haar opmerzaamheid als het ging om fouten en onduidelijkheden in de tekst.
- Dank aan uitgeefster Petra Prescher die meteen enthousiast was voor dit project en met haar team van Noordhoff voor dit prachtig uitgevoerde boek zorgde.
- Dank aan editor Ada Bolhuis van Editekst, aan Ilse van Looyen en Lieke te Winkel van Noordhoff, en Ebel Kuipers die de hardnekkigste fouten uit de tekst haalden en zorgden voor de vormgeving.
- Omdat ik de uitzonderlijke uitkomst van mijn CO<sub>2</sub>-berekening over ‘Nederland onder een stolp’ van hoofdstuk 5 zelf niet kon geloven, heb ik deze laten narekenen door Eise Jan Dekker en Bas Siebring: mijn berekening bleek helaas te kloppen (zie figuur 5.7). Met dank aan beide chemici.

Emmen, oktober 2021,

Roel Grit

[www.roelgrit.nl](http://www.roelgrit.nl)





**1**

---

**Natuur-  
wetenschap  
is overal**

**Veel belangrijke hedendaagse wereldproblemen hebben te maken met menselijk handelen. Denk aan de opwarming van de aarde, de stikstofcrisis, voedselschaarste en de energiecrisis. Om deze problemen te begrijpen, heb je kennis uit de *natuurwetenschappen* nodig. Om deze kennis van natuurkunde, scheikunde en biologie paraat te hebben, vind je in dit hoofdstuk belangrijke achtergrondinformatie. De volgende hoofdstukken gaan dieper in op de details.**

De informatie in dit hoofdstuk is basaal en bedoeld om een 'leek' snel bij te praten en om de kennis van een ingewijde op te frissen. De uitleg is opzettelijk niet altijd strikt wetenschappelijk geformuleerd om de theorie niet nodeloos ingewikkeld te maken.

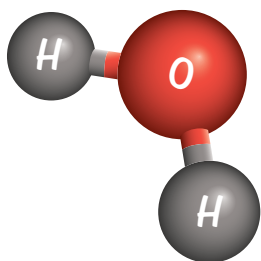
Bij de verbranding van kaarsvet in een waxinelichtje verbindt de paraffine van de kaars zich met zuurstof uit de lucht. Daarbij ontstaan – naast warmte en licht – verbrandingsgassen als 'afval' die in de lucht terecht komen. Bij dit verbrandingsproces veranderen de stoffen. Er verdwijnt paraffine en zuurstof: ze *reageren* met elkaar. Bovendien ontstaan er nieuwe stoffen, zoals roet, koolstofdioxidegas en waterdamp.

Het reageren van een stof met een andere stof – waarbij nieuwe stoffen ontstaan – heet in de *scheikunde* (ofwel *chemie*) een *chemische reactie*. Sommige chemische reacties leveren energie voor transport en warmte voor woningen. In de industrie komen via chemische reacties honderdduizenden nuttige producten tot stand, zoals kunststoffen, medicijnen, verven en kunstmest. Die reacties kosten vaak energie. Scheikunde houdt zich dus bezig met veranderende stoffen.

*Natuurkunde* (ofwel *fysica*) bestudeert niet de veranderende samenstelling van een stof, maar kijkt naar de *eigenschappen* van materialen. Onderwerpen in de natuurkunde zijn bijvoorbeeld elektriciteit, de werking van licht in een telescoop en een beeldscherm, beweging van auto's en raketten, luchtdruk en weersverschijnselen. Elke stof, alle *materie* om ons heen bezit *fysische eigenschappen*, zoals een smeltpunt, een kookpunt, lichtbreking, elektrische geleiding, radioactiviteit en hardheid. De eigenschap '*brandbaarheid*' van een stof hoort bij de scheikunde, omdat de stof hierdoor blijvend verandert.

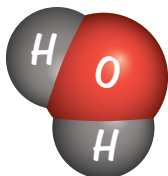
## Alles bestaat uit atomen en moleculen

Alle stoffen om ons heen noemen we de *materie*, zoals lucht, water, steen en hout. Alle materie om ons heen bestaat uit *moleculen*. De gasen in de atmosfeer bestaan bijvoorbeeld (en vooral) uit zuurstofmoleculen en stikstofmoleculen. Water bestaat uit watermoleculen – met de welbekende *scheikundige formule*  $H_2O$  – en alcohol bestaat uit alcoholmoleculen. Dit zijn kleine moleculen. In ons lichaam vind je ook grotere moleculen zoals eiwitmoleculen, hormonen, (bloed)suikermoleculen en DNA-moleculen.



1.1 Watermolecuul met drieatomen

Sommige moleculen bestaan uit enkele *atomen*, sommige uit tienduizenden. De molecuulstructuur van bijvoorbeeld een *watermolecuul*  $H_2O$  bestaat uit drie atomen en wordt vaak weergegeven met een 'ball & stick' model. Het stokje hierin 'staat' voor de aantrekkende kracht tussen twee atomen. In 1.1 zie je het watermolecuul met twee waterstofatomen H en een zuurstofatoom O. Let wel: in de formule  $H_2O$  hoort het cijfer 2 bij de H. Je spreekt de *waterformule* uit als *Haa-twee-Oo*. Scheikundigen zeggen ook wel: water is een *verbinding* tussen zuurstof en waterstof.

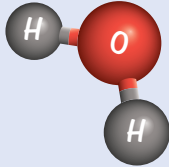
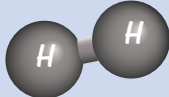
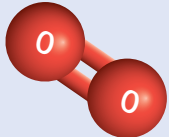
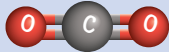
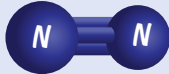
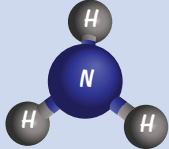
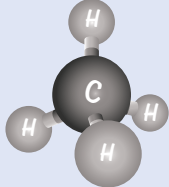
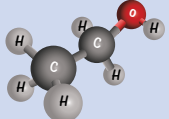


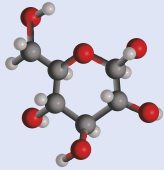
1.2 'Echt' watermolecuul

Het werkelijke molecuul bevat geen 'stokken', maar heeft meer de vorm zoals de overlappende atomen in 1.2. Via speciale technieken is het tegenwoordig mogelijk om moleculen zichtbaar te maken.

Alle materie bestaat uit moleculen. Moleculen zijn opgebouwd uit (één of meer) atomen die elkaar aantrekken. Een molecuul dat uit verschillende atomen bestaat noem je een *verbinding*.

In het volgende overzicht zie je enkele voorbeelden van eenvoudige, maar belangrijke moleculen.

| Molecuul          | Molecuulstructuur   | Aantal atomen                                       | Molecuul-formule                 | Bijzonderheid  |
|-------------------|---|---|----------------------------------|--|
| Water             |    | 2 × waterstof H<br>1 × zuurstof O                   | H <sub>2</sub> O                 | Kraanwater   |
| Waterstof         |    | 2 × waterstof                                       | H <sub>2</sub>                   | Brandbaar gas<br>Lichter dan lucht   |
| Zuurstof          |    | 2 × zuurstof O                                      | O <sub>2</sub>                   | In lucht nodig voor ademen<br>Ontstaat bij fotosynthese<br>Zuurstof vormt oxiden met metalen, zoals roesten bij ijzer            |
| Kool(stof)dioxide |    | 1 × koolstof C<br>2 × zuurstof O                    | CO <sub>2</sub>                  | Komt vrij bij verbranding van fossiele brandstoffen  |
| Stikstof          |    | 2 × stikstof N                                      | N <sub>2</sub>                   | Niet reactief stikstofgas in de lucht<br>Bevat drie bindingen<br>In lucht met alleen stikstof, stik je.                          |
| Ammoniak          |  | 1 × stikstof N<br>3 × waterstof H                   | NH <sub>3</sub>                  | Gasvormige stikstofverbinding<br>Komt onder andere vrij in landbouw<br>Zit in huishoudammonia                                    |
| Methaan           |  | 1 × koolstof C<br>4 × waterstof                     | CH <sub>4</sub>                  | Kool(stof)waterstofverbinding<br>Brandbaar gedeelte van aardgas<br>In darmgas (winden)<br>Levert CO <sub>2</sub> bij verbranding |
| Alcohol           |  | 2 × koolstof C<br>6 × waterstof H<br>1 × zuurstof O | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | In alcoholhoudende dranken   |

| Molecuul | Molecuulstructuur   | Aantal atomen  | Molecuul-formule | Bijzonderheid   |
|----------|---|--|------------------|---|
| Glucose  |  | 6 × koolstof C<br>12 × waterstof H<br>6 × zuurstof O | $C_6H_{12}O_6$   | Ontstaat tijdens fotosynthese<br>Druivensuiker of bloedsuiker<br>Eén van de koolhydraten<br>Kan uit zetmeel worden gewonnen<br>Zie hoofdstuk over voeding |

## Beperkt aantal atoomsoorten (elementen)

Zoals je kunt zien zijn moleculen opgebouwd uit atomen. Er komen in de natuur 92 verschillende *atoomsoorten* voor. We noemen die atoomsoorten de *elementen*, omdat alles om ons heen uit deze elementaire bouwstenen is opgebouwd. Een zuiver element bestaat uit slechts één soort atomen. Zuiver goud, ijzer, stikstof, koolstof, waterstof en zuurstof zijn voorbeelden van elementen. Zoals aangegeven, vormen atomen van elementen samen moleculen. Water is geen element, maar een *verbinding*, maar let op: waterstof is wel een element. De wetenschap heeft aan elk element een naam en een uniek *symbool* toegekend. Hier zie je de chemische symbolen van enkele belangrijke elementen.

| Element   | Chemisch symbool |
|-----------|------------------|
| IJzer     | Fe               |
| Koolstof  | C                |
| Stikstof  | N                |
| Zuurstof  | O                |
| Lood      | Pb               |
| Waterstof | H                |

| Element | Chemisch symbool |
|---------|------------------|
| Lithium | Li               |
| Thorium | Th               |
| Uranium | U                |
| Goud    | Au               |
| Zilver  | Ag               |
| Argon   | Ar               |

Een *chemisch* symbool van een element is vaak een Latijnse afkorting of samentrekking, zoals Ag voor de Latijnse naam *argentum* voor zilver. Sommige namen van elementen zijn afgeleid van de namen van wetenschappers (Nobelium, Curium), een eigenschap van het element (Radium) of het gebied waar het element is ontdekt (Polonium, Germanium).

Op basis van het werk van vele wetenschappers is een lijst van alle elementen opgesteld. Deze lijst heet het *Periodiek Systeem der Elementen* (zie 1.4). Hierin worden de atomen van elk element in opklimmende 'grootte' van hun atoom achter elkaar gezet.

|    |    |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |
|----|----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| 1  |    |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 2   |    |    |    |    |
| H  |    |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | He  |    |    |    |    |
| 3  | 4  |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 5   | 6   | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Li | Be |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | B   | C   | N  | O  | F  | Ne |
| 11 | 12 |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 13  | 14  | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Na | Mg |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Al  | Si  | P  | S  | Cl | Ar |
| 19 | 20 | 21     | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  |    |    |    |    |
| K  | Ca | Sc     | Ti  | V   | Cr  | Mn  | Fe  | Co  | Ni  | Cu  | Zn  | Ga  | Ge  | As  | Se  | Br  | Kr  |    |    |    |    |
| 37 | 38 | 39     | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 54  |    |    |    |    |
| Rb | Sr | Y      | Zr  | Nb  | Mo  | Tc  | Ru  | Rh  | Pd  | Ag  | Cd  | In  | Sn  | Sb  | Te  | I   | Xe  |    |    |    |    |
| 55 | 56 | 57-71  | 72  | 73  | 74  | 75  | 76  | 77  | 78  | 79  | 80  | 81  | 82  | 83  | 84  | 85  | 86  |    |    |    |    |
| Cs | Ba | La*    | Hf  | Ta  | W   | Re  | Os  | Ir  | Pt  | Au  | Hg  | Tl  | Pb  | Bi  | Po  | At  | Rn  |    |    |    |    |
| 87 | 88 | 89-103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 |    |    |    |    |
| Fr | Ra | Ac**   | Rf  | Db  | Sg  | Bh  | Hs  | Mt  | Ds  | Rg  | Cn  | Nh  | Fl  | Mc  | Lv  | Ts  | Og  |    |    |    |    |

© Roel Grit

|             |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|-------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
|             | 57   | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68  | 69  | 70  | 71  |
| Lanthaniden | La*  | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er  | Tm  | Yb  | Lu  |
|             | 89   | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Actiniden   | Ac** | Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm  | Md  | No  | Lr  |

1.4 Periodiek Systeem der Elementen

De scheikundige eigenschappen van elementen blijken in deze reeks periodiek terug te komen, dat wil zeggen dat het Periodiek Systeem zo is opgesteld dat elementen met vergelijkbare *chemische eigenschappen* onder elkaar staan. Zo staan in de kolom geheel rechts alle zogenoemde edelgassen onder elkaar, beginnend met helium. Atomen na nummer 92 (Uranium) komen niet vrij in de natuur voor, maar worden kunstmatig gemaakt in *laboratoria*, *deeltjesversnellers* en *kernreactoren*. Ze worden bijvoorbeeld gebruikt voor medische toepassingen (radioactieve isotopen voor diagnoses en therapie), voor onderzoek naar materialen en als brandstof voor kerncentrales.

## Belangrijke moleculen in dit boek

Er zijn miljoenen verschillende *verbindingen* tussen elementen. Zo'n verbinding bestaat uit atomen, gegroepeerd tot moleculen. Een paar voorbeelden worden nader uitgewerkt, in de rest van het boek volgen er meer op het moment dat ze van belang zijn.

## Zuurstof of O<sub>2</sub>

*Zuurstof* komt voor ongeveer 21% voor in de *lucht*. De (vele) stoffen die verbindingen met koolstof C en waterstof H bevatten – zoals hout, aardolieproducten, steenkool, vetten en koolhydraten – kunnen bij hoge temperatuur *verbranden*. Bij verbranding van een molecuul verbinden de aanwezige koolstofatomen C zich met zuurstof O<sub>2</sub> uit de lucht tot moleculen koolstofdioxide CO<sub>2</sub>. De eveneens in een molecuul aanwezige waterstofatomen H verbinden zich ook met zuurstof en vormen watermoleculen H<sub>2</sub>O. Een zuurstofmolecuul is reactief en verbindt zich gemakkelijk met atomen van andere elementen. Een verbinding van een element met zuurstof heet een *oxide*, zo bestaat het aluminiumerts *bauxiet* uit aluminiumoxide en roest en *ijzererts* (voornamelijk) uit *ijzeroxide*. Om hieruit respectievelijk het metaal aluminium en het metaal ijzer te produceren moet via chemische reacties de zuurstof aan het erts worden onttrokken. Bij de lage temperatuur van ons lichaam worden voedingsstoffen in ons voedsel met behulp van luchtzuurstof 'verbrand'.

## Water of H<sub>2</sub>O

Het leven op aarde is onmogelijk zonder *water*. Het watermolecuul is belangrijk: ons lichaam bestaat voor bijna 60% uit deze vloeistof. In ons bloed en in het water van onze lichaamscellen spelen zich ingewikkelde scheikundige reacties af. Reacties die bijvoorbeeld signalen via *hormonen* in het bloed en zenuwen vanuit de hersens doorgeven aan een spier. Door scheikundige reacties in een spier trekt deze samen en kun je een glas naar je mond brengen. Water is essentieel voor het leven op aarde. Op aarde komt veel water voor: 70% van de oppervlakte van de aarde is bedekt met water. Water geeft onze planeet – gezien vanuit de ruimte – een blauwe kleur. Het meeste water op aarde bevat zout, een klein deel van het water is 'zoet' (zoutloos) en kan gebruikt worden voor drinkwater en landbouw. Ook in de lucht komt water voor als onzichtbare *waterdamp*. Als dat condenseert tot kleine druppeltjes krijg je wolken. Waterdamp in de lucht, vloeibaar water in de oceanen en vast *ijs* van gletsjers hebben een grote invloed op het weer en het klimaat. Waterdamp is een *broeikasgas*.

## Koolstofdioxide (kooldioxide) of CO<sub>2</sub>

*Koolstofdioxide*<sup>1</sup> is een molecuul met één koolstof en twee (di=twee) zuurstof, als formule: CO<sub>2</sub>. Planten nemen met behulp van energie uit zonlicht *koolstofdioxidegas* uit de lucht op, zo groeien ze. Dieren eten



de plant op, verteren haar, gebruiken de bestanddelen voor opbouw en energievoorziening en ademen dit koolstofdioxidegas weer uit. De energie die mens en dier gebruiken, komt uiteindelijk uit de plant, ook als ze vlees eten. Beide eten (uiteindelijk) planten en zetten die deels om in glucose. Deze glucose is een brandstof voor ons lichaam. In de uitleg hierna komt dat bij fotosynthese nader aan de orde.

Als je koolstofdioxide  $\text{CO}_2$  oplost in water krijg je *koolzuur*.  $\text{CO}_2$  zit daarom als gas opgelost in *koolzuurhoudende* dranken, zoals cola, bier en champagne. Je ziet  $\text{CO}_2$  als belletjes omhoogkomen in het glas. Het gas vormt met water het zwakzure koolzuur dat de drank een fris zure smaak geeft.

$\text{CO}_2$  komt ook – in grote hoeveelheden – vrij bij het verbranden van *fossiele brandstoffen*, zoals aardgas en aardolieproducten. Daar zit koolstof in, omdat olie en gas en steenkool uiteindelijk allemaal gefossiliseerde organismen (planten, bomen en plankton) zijn die heel lang geleden  $\text{CO}_2$  hebben opgenomen. Ondanks dat lucht maar weinig  $\text{CO}_2$  bevat – momenteel 0,0415% – is het een belangrijk *broeikasgas* en levert het de grootste bijdrage aan de opwarming van de aarde. En als er door menselijk toedoen meer  $\text{CO}_2$  in de lucht komt, lost er ook meer van op in zee-water. Zeewater wordt hierdoor – net als frisdrank met ‘koolzuur’ – zuurder. Dit heeft nadelige gevolgen voor het leven in zee. Zuur tast bijvoorbeeld het kalksteen in koraalriffen aan.

### **Koolstofmonoxide CO en koolmonoxidevergiftiging**

Een koolmonoxidemolecuul bestaat uit één koolstofatoom met slechts één zuurstofatoom. Door het ontbreken van een zuurstofatoom in CO ten opzichte van  $\text{CO}_2$  blokkeert *koolmonoxide* bij inademing het zuurstoftransport in het lichaam. Je wordt hier eerst suf van en kunt hier daarom ongemerkt aan overlijden. Het geurloze gas CO is een sluipmoordenaar, die ook bekend is van *koolmonoxidevergiftiging* of – nog uit de tijd van het stoken op steenkool – kolendampvergiftiging. Het gas ontstaat bij verbranding met onvoldoende toevoer van zuurstof van o.a. aardgas, benzine en vroeger steenkool. Berucht is onvoldoende ventilatie in een kleine keuken met een gasfornuis of geiser of de verwarming in een caravan. Er zijn voor dit soort ruimtes koolmonoxidemelders te koop. Koolmonoxide kan ook ontstaan in het verkeer door ‘onvolledige verbranding’ van autobrandstof. Ook hier ontstaat geen  $\text{CO}_2$  maar – door zuurstoftekort – het giftige CO.

## Ammoniakgas NH<sub>3</sub>

Een ammoniakmolecuul bestaat uit een stikstofatoom en drie waterstofatomen. Het gas is bekend van de stikstofcrisis en geeft als opgelost gas in water de geur aan het schoonmaakmiddel *ammonia*. Samen met andere stikstofverbindingen in de lucht uit het verkeer is ammoniak uit de landbouw medeverantwoordelijk voor de huidige *stikstofcrisis*. Hoofdstuk 2 gaat hier dieper op in.

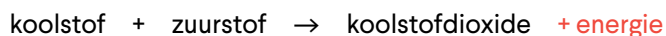
## Chemische reacties: moleculen ‘doen’ het met elkaar

Moleculen kunnen met elkaar ‘reageren’: er speelt zich een zo genoemde *scheikundige reactie* af. Bij deze chemische reactie ‘verdwijnen’ de oorspronkelijke moleculen en ontstaan uit hun *atomen* nieuwe *moleculen*. Bij een scheikundige reactie komt meestal *energie* vrij of wordt energie opgenomen. Vaak *energie* in de vorm van *warmte*, maar ook als *elektrische energie*, bijvoorbeeld in een batterij of als licht zoals bij vuur.

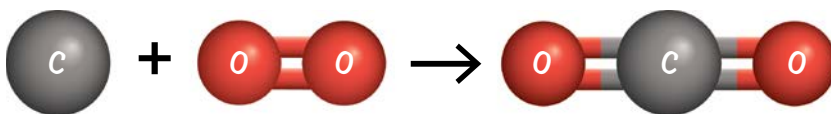
Hierna volgen ter illustratie een paar uitgewerkte voorbeelden van scheikundige reacties.

### Verbranden van steenkool (koolstof)

Koolstof C en zuurstof O<sub>2</sub> uit de lucht reageren met elkaar en worden omgezet in koolstofdioxide CO<sub>2</sub>. Een reactie van een brandbare stof met zuurstof heet een *verbranding*. Daarbij komt warmte-energie vrij en daar is het verbranden van steenkool om begonnen. Dit kun je in woorden weergeven in een zogenoemd *reactieschema*.



Het verbranden van alle koolstofhoudende (brand)stoffen, zoals methaan CH<sub>4</sub>, benzine, suiker en – zoals gezien – ook steenkool C, levert ook het verbrandingsgas koolstofdioxide en levert dus een bijdrage aan de toename van het broeikaseffect in de atmosfeer. Als je de verbranding van koolstof uitwerkt met moleculen, krijg je de reactie die je ziet in 1.5.



1.5 Verbranding van koolstof in steenkool

Als je dit beknopt – en met scheikundige formules – opschrijft, krijg je een zogenoemde *reactievergelijking*.



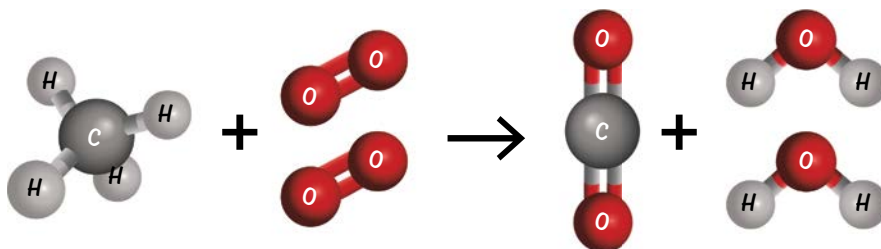
Bij een chemische reactie worden oude bindingen tussen atomen verbroken en ontstaan er nieuwe bindingen: de atomen worden opnieuw gerangschikt. In de volgende reactie is dat nog duidelijker.

### Verbranden van aardgas $\text{CH}_4$

Het aardgas uit Groningen bestaat voornamelijk uit *methaan* met de chemische formule  $\text{CH}_4$ . Het methaan uit *aardgas* reageert goed met zuurstof in de lucht. In een reactieschema wordt dit:



Bij deze verbrandingsreactie komt *energie* weer vrij als warmte. Je ziet in 1.6 hoe deze verbrandingsreactie met behulp van moleculen verloopt.



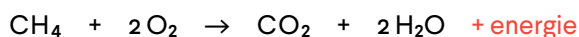
1.6 Verbranding van methaan

Als je kookt op een gasfornuis, worden je keukenruiten niet alleen nat van verdampt water uit je soeppan. Ze beslaan ook, omdat tijdens de verbranding van aardgas als reactieproduct waterdamp vrijkomt. De zichtbare, grijze wolken boven een aardgasgestookte energiecentrale bestaan grotendeels uit onschuldig waterdamp. Het eveneens vrijkomende broeikasgas koolstofdioxide  $\text{CO}_2$  uit de pijp is onzichtbaar!

De reactie hiervoor laat nog iets belangrijks zien. Tel de atomen links en rechts van de pijl maar eens op.

Bij een chemische reactie worden atomen – links van de pijl – opnieuw gerangschikt: hierbij ontstaan of verdwijnen er geen atomen. Scheikundigen noemen dit *de wet van behoud van massa*.

De reactievergelijking (in formules) van het verbranden van aardgas ziet er dan zo uit:



De wet van behoud van massa dwingt af dat in deze reactievergelijking het aantal twee vóór de moleculen  $\text{O}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  moet worden geplaatst. Tel maar weer na: de aantallen atomen voor en na de reactie kloppen nu: rechts en links één C-, vier H- en vier O-atomen.

Een molecuul met verschillende atomen kun je wijzigen. Atomen herschikken zich immers, maar de *atomen* – en dus *elementen* – zelf zijn *onveranderlijk*. Een bodemverontreiniging met giftige zware metalen als lood of kwik – beide een element – in de moleculen kun je niet onschadelijk maken door bijvoorbeeld verbranding: *elementen/atomen zijn onvernietigbaar in de scheikunde*. Je kunt alleen de verontreinigde bodem met lood of kwik afgraven en elders ‘opbergen’. Giftige chemische verbindingen kun je wel laten reageren met andere stoffen, zodat een minder schadelijke verbinding ontstaat.

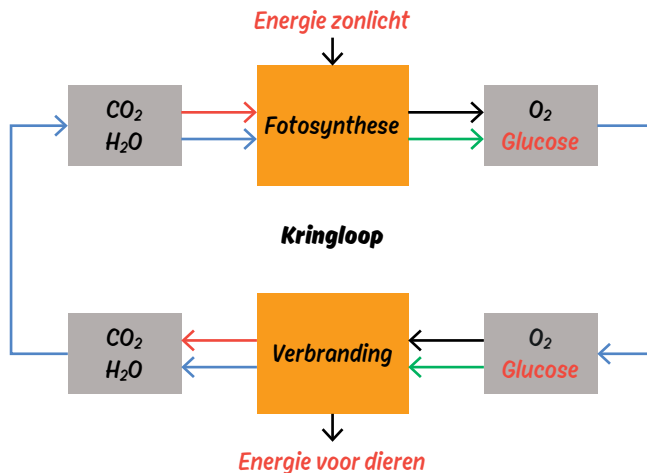
### Fotosynthese en de koolstofkringloop

Nog een voorbeeld van een reactie. *Planten* nemen het (broeikas)gas  $\text{CO}_2$  uit de lucht op en zetten dit samen met door de wortels uit de bodem opgezogen water om in glucose (een soort suiker) en zuurstofgas. De plant geeft het ontstane zuurstofgas af aan de atmosfeer. Als energiebron gebruikt de plant *zonlicht*. Deze reactie heet de *fotosynthese*. Het zonlicht staat links in het schema omdat het nodig is om de reactie uit te voeren. In een *reactieschema* ziet de *fotosynthese* er zo uit:



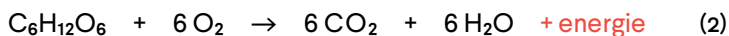
Uit deze *glucose* maakt de plant met behulp van meststoffen uit de bodem *koolhydraten* (o.a. cellulose voor hout en zetmeel), *eiwitten* en alle

andere moleculen in een plant. Gezien het reactieschema is het waarschijnlijk dat glucose C-,H- en O-atomen bevat. Dat klopt, glucose heeft de formule  $C_6H_{12}O_6$ . De *koolstof* in de  $CO_2$  komt terecht in glucose. Als je rekening houdt met de wet van behoud van massa geldt voor de fotosynthese de volgende reactievergelijking. Glucose heeft de formule  $C_6H_{12}O_6$ . Tel links en rechts maar weer na of het aantal atomen klopt:



1.7 Koolstofkringloop: fotosynthese en verbranding

*Mensen en dieren* eten planten, bijvoorbeeld een druif met glucose (druivensuiker) erin. Deze glucose – in ons bloed noemen we het bloedsuiker – is een brandstof en wordt in onze lichaamscellen omgezet in energie: de zonne-energie komt weer vrij als het ware. Dieren en mensen ademen hierbij het benodigde luchtzuurstof  $O_2$  in via de longen en *verbranden* daarmee de glucose. Daarbij ontstaat energie voor onze lichaamsprocessen. Hierbij ontstaan tevens water en  $CO_2$  die we via ademhaling en urine weer kwijtraken. De koolstof uit de glucose komt dus – dankzij ingeademde zuurstof – weer vrij als  $CO_2$ . Dit geeft exact de omgekeerde reactie als hiervoor.



De energie die dankzij de zon is opgeslagen in glucose, wordt zodoende door mens en dier gebruikt om te leven. Je kunt stellen dat de mens op *zonne-energie* loopt en daarbij  $CO_2$  uitstoot.

Fotosynthese in de plant en verbranding in mens, dier en plant ('s nachts) heten samen wel de *koolstofkringloop*.

## Ons leven tussen gassen

Omdat veel milieuproblemen te maken hebben met de lucht<sup>2</sup> om ons heen, hier iets over de atmosfeer.<sup>3</sup> Om de aarde bevindt zich een mengsel van onzichtbare gassen: lucht. In het heelal – buiten de atmosfeer van de aarde – ontbreken de gassen die in de aardse lucht aanwezig zijn. Satellieten in de ruimte bevinden zich in dit *luchtledige*, ook wel *vacuüm* genoemd. In de tabel zie je de samenstelling van de atmosfeer op zee-niveau.

### *Samenstelling zeelucht in volumeprocenten (bron: Binas)*

| Gas             | Molecuulformule  | Percentage in lucht        |
|-----------------|------------------|----------------------------|
| Stikstof        | N <sub>2</sub>   | ± 78%                      |
| Zuurstof        | O <sub>2</sub>   | ± 21%                      |
| Argon (edelgas) | Ar               | ± 1%                       |
| Koolstofdioxide | CO <sub>2</sub>  | 0,0415%                    |
| Methaan         | CH <sub>4</sub>  | 0,00022%                   |
| Waterdamp       | H <sub>2</sub> O | Variabel (bijvoorbeeld 1%) |

De zwaartekracht van de aarde trekt de gassen in de atmosfeer naar zich toe en zorgt ervoor dat de gassen in onze atmosfeer niet weglekken naar de ruimte, zoals gebeurd is op de planeten Mercurius en Mars en op onze eigen maan. De tientallen kilometers hoge luchtkolom boven ons hoofd zorgt voor flink gewicht – *luchtdruk* genoemd – op het aardoppervlak. Om een idee te geven hoeveel dit is: op elke vierkante centimeter – ongeveer een kwart postzegel – rust een kolom lucht van ongeveer 1 kilogram! De luchtdruk zorgt zo op een oppervlakte van slechts één vierkante meter – de oppervlakte van ruim 10 standaard stoeptegels – voor 10.000 kilo lucht ofwel 10 ton!

Een oude eenheid van luchtdruk is de 'atmosfeer'. De luchtdruk op het aardoppervlak schommelt rond 1 atmosfeer. De moderne natuurkunde gebruikt de eenheid *pascal* in plaats van de atmosfeer. Doordat de zon het aardoppervlak op verschillende plaatsen verschillend verwarmt,

ontstaan *luchtdrukverschillen*. Lucht verplaatst zich van een hoge druk naar een lage druk: wij nemen dit waar als wind. Door de draaiing van de aarde komt ons weer – inclusief wind – meestal vanuit het westen.

Door menselijk toedoen kan *luchtverontreiniging* optreden. Het gaat daarbij meestal om stoffen die in kleine hoeveelheden al schade kunnen aanrichten aan mens en milieu.

Enkele voorbeelden van luchtverontreinigende stoffen.

- extra koolstofdioxide (broeikasgas) door verbranding fossiele brandstoffen;
- methaan (broeikasgas);
- ammoniakgas (bemesting van de bodem);
- gasvormige stikstofoxiden (bemesting van de bodem);
- fijnstof (zoals roetdeeltjes door dieselmotoren);
- zwaveldioxide (verbranding zwavelhoudende stoffen, zoals hout in kachels), giftig en zorgt voor zure regen;
- drijfgassen (aantasting beschermende ozonlaag).

Koolstofdioxide en methaan zijn krachtige *broeikasgassen*.<sup>4</sup> Ze komen van nature maar heel weinig voor in de atmosfeer, respectievelijk 0.0415% en 0.0002%. Menselijk handelen heeft daardoor al snel een grote relatieve invloed op hun gehalte.

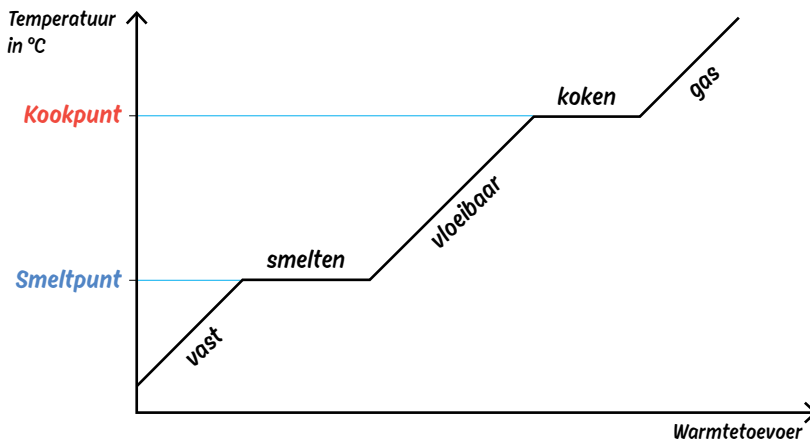
In de hogere luchtlagen van de atmosfeer komt het gas ozon voor. Ozon  $O_3$  heeft één zuurstof atoom meer dan luchtzuurstof  $O_2$  dat slechts uit twee atomen bestaat. Ozon is een reactieve stof en inademen is schadelijk, maar in de zogenoemde 'ozonlaag' van de atmosfeer is het gas nuttig en houdt het schadelijk *ultraviolet licht* van de zon tegen. De – inmiddels verboden – fluorhoudende *drijfgassen* in *sputbussen* tasten de ozonlaag aan. Door drijfgassen ontstaan *gaten in de ozonlaag*, vooral boven de Zuidpool.

---

## Opwarming van de aarde en temperatuur

Bij smeltende ijskappen en opwarming van de aarde gaat het over *temperatuur*. Temperatuur heeft alles te maken met de beweging van moleculen om ons heen. Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller moleculen in de lucht bewegen. De Zweedse wetenschapper *Celsius* bedacht onze thermometer met een schaalverdeling om temperaturen te kunnen meten.<sup>5</sup> Hij ging uit van water, de belangrijkste vloeistof op aarde. Tijdens het ont-

doeien van een ijsblokje blijft de temperatuur bij het vriespunt constant, onder normale luchtdruk tenminste (zie 1.8). De Zweed noemde dit *vriespunt* nul graden. Later noemde men dit nul graden *Celsius*, afgekort  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bij verwarmen van water zal bij het *kookpunt* iets vergelijkbaars optreden: tijdens het kookpunt blijft de temperatuur constant. De warmtetoevoer zorgt ervoor dat de moleculen sneller bewegen, zodat ze de vloeistof verlaten. Het verlaten van de vloeistof is niets anders dan *verdampen*. Water heeft volgens de definitie van Celsius – onder normale luchtdruk – een kookpunt van  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bij het kookpunt verdampt de vloeistof snel en niet alleen aan het oppervlak: binnenin de kokende vloeistof ontstaan ook waterdampbellen (dit zijn dus geen luchtbellen).



1.8 Drie toestanden van water

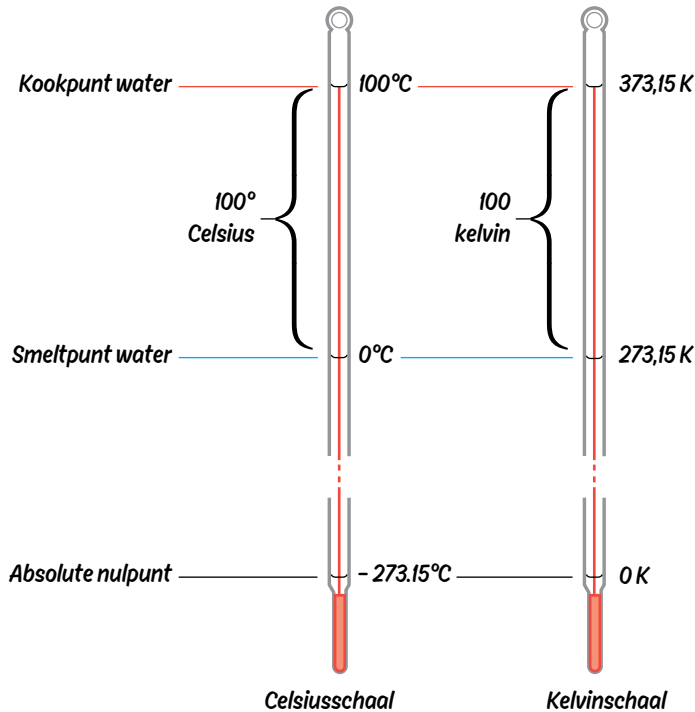
De (lucht)druk is hierbij belangrijk. Als de druk toeneemt, verlaten moleculen de vloeistof moeilijker. In een afgesloten snelkookpan zorgt de hogere druk dat het kookpunt van water geen  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , maar  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  is: de erwtensoep is bij deze hogere temperatuur eerder gaar.

Bij hogere druk stijgen kookpunt en smeltpunt van een stof. Bij lagere druk is dat omgekeerd.

Bij het sterk afkoelen van een stof komt er een moment dat moleculen stilstaan. Kouder dan dat kan niet. De allerlaagste temperatuur is afgerond  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ofwel  $273$  graden 'onder nul'. De Engelse wetenschapper Kelvin noemde dit het *absolute nulpunt*. In 1.9 zie je beide temperatuurschalen weergegeven met behulp van een ouderwetse thermometer. De gebruikte meeteenheid bij de rechterschaal is *kelvin* (zonder het woord 'graden').



Bij 0 kelvin staan alle moleculen stil.



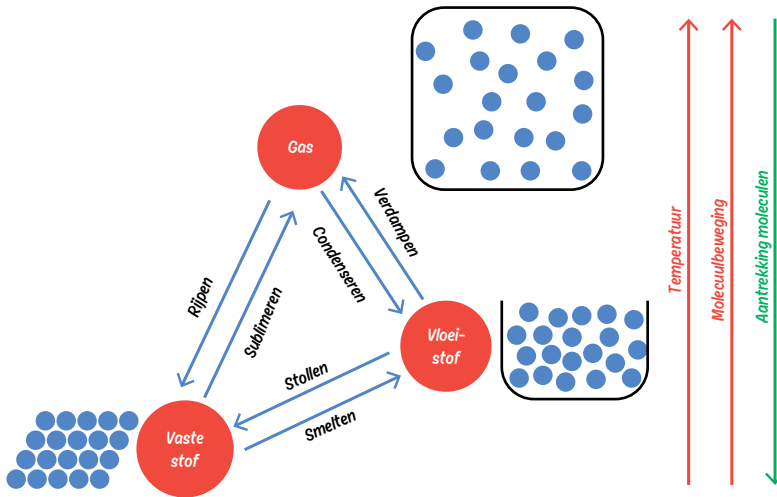
1.9 Kwikthermometer, temperatuur in graden celsius en in kelvin

## Materie in verschijningsvormen

Om te begrijpen hoe een moderne warmtepomp voor huisverwarming werkt, is kennis nodig van de verschijningsvormen – ook *fasen* genoemd – waarin de materie om je heen voorkomt. De materie om je heen – de ‘stoffen’ – kom je tegen als *vaste stof*, als *vloeistof* en als *gas*. Water kom je tegen als vast ijs, vloeibaar water en gasvormige waterdamp. Ook kaarsvet komt voor als vast paraffine (kaarsvet), vloeibaar paraffine (gesmolten kaarsvet) en verdampt kaarsvet. Vloeibaar en gasvormig kaarsvet is datgene wat uiteindelijk in de pit verbrandt. Gasvormig kaarsvet is wat je ruikt nadat je de kaars uitblaast. Een vast metaal als goud kun je smelten bij 1064 °C en bij 2700 °C zelfs verdampen tot een gas.

## Van fase naar fase

In 1.10 zie je de genoemde drie fasen. Let op de pijlen rechts.



1.10 Fasen van de stof bij verschillende temperaturen

Deze drie fasen vinden hun oorsprong in de moleculen van de stof en de *beweging* die ze maken bij een bepaalde temperatuur. Moleculen trekken elkaar aan, maar hoe hoger de temperatuur hoe meer moleculen bewegen en hoe minder ze elkaar aantrekken.

- Bij een *vaste stof* bevinden de moleculen zich dichtbij elkaar, trekken elkaar aan en 'wiebelen' heen en weer om een soort evenwichtstand. Een vaste stof is compact, heeft een eigen 'vorm' en kan die vorm vasthouden. Bij sommige vaste stoffen stapelen moleculen zich op een in nette kristalstructuur, zoals een suiker- of zoutkristal.
- Bij een *vloeistof* – bij een hogere temperatuur – 'glijden' moleculen langs elkaar heen en is een vat (ton of beker) met een bodem nodig om ze bij elkaar te houden. In vloeistoffen kun je andere stoffen oplossen. In water kun je bijvoorbeeld zout, suiker, kooldioxidegas en zuurstofgas oplossen. In wasbenzine lost vet op, zodat je er vlekken mee kunt verwijderen.
- Om een *gas* – bij nog hogere temperatuur – bij elkaar te houden, heb je een volledig afgesloten omhulling (gascilinder) nodig om de moleculen niet te laten ontsnappen naar de omgeving. Een gas is het minst compact en bevat veel ruimte tussen moleculen. In tegenstelling tot vaste stoffen en vloeistoffen, kun je een gas samenpersen in een kleiner volume. Sommige gassen kun je samenpersen tot een vloeistof, bijvoorbeeld butagas in een campingstel. Verschillende gassen

kun je door de grote ruimte tussen de moleculen goed met elkaar mengen. Denk maar aan de gassen in lucht.

Als je de temperatuur van een stof verandert, kan de fase veranderen. Dit heet een *faseovergang*.

### Faseovergangen

| Proces             | Overgang                 | Energie-effect             | Opmerking   |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Smelten            | vast wordt vloeibaar     | kost energie               | warmte toevoeren  |
| Stollen            | vloeibaar wordt vast     | komt energie vrij          | bij water: 'bevrozen'   |
| Verdampen          | vloeibaar wordt gas/damp | kost energie (kost warmte) | bij verdampend zweet koelt de huid af                         |
| Condenseren        | gas wordt vloeibaar      | komt energie vrij          | stoom geeft bij condensatie veel energie af                   |
| Sublimeren         | vast wordt gas           | kost energie               | 'vervluchtigen': sneeuw dat zonder eerst te smelten verdwijnt |
| Rijpen (vervasten) | gas wordt vast           | komt energie vrij          | 'rijpen': ijskristallen aan de bomen in de winter             |

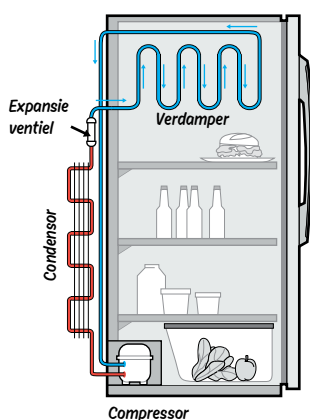
Bij de energie-effecten in 1.10 zie je dat één richting van de pijl energie kost, terwijl bij de omgekeerde richting dezelfde energie vrijkomt; beide vaak in de vorm van warmte. Als een effect energie kost, moet je energie toevoegen. Vaak wordt de energie van een verdampende vloeistof aan de omgeving onttrokken en koelt de omgeving daardoor af. Verdampende deodorant onder je oksel koelt af, omdat de benodigde energie hiervoor als warmte aan je huid wordt onttrokken. Evenzo koelt een fles met vloeibaar campinggas op de camping af door het verdampende butagas.

De wet van behoud van energie luidt: de totale hoeveelheid energie in een gesloten systeem blijft constant. Energie kan niet worden gecreëerd of vernietigd, maar alleen worden omgezet van de ene in de andere vorm, bijvoorbeeld elektrische energie in licht of warmte.

Het zoeken naar de eeuwigdurende beweging (het zogenoemde 'perpetuum mobile') die *gratis energie* zou moeten leveren, is volgens deze 'ijzeren' natuurwet zinloos.

## Koelkast en warmte pomp<sup>6</sup>

Als je vloeibare deodorant onder je arm spuit, wordt je oksel koud. De deo verdampt tot gas en dat kost warmte, die wordt onttrokken aan je warme oksel. Een *koelkast* (zie 1.11) maakt gebruik van deze faseovergang van vloeibaar naar gas. In de koelkast verdampt in een gesloten systeem een geschikte vloeistof onder lage druk en – omdat verdampen warmte kost – koelt daardoor het binnenste van de koelkast af. De *compressor* aan de achterzijde van de koelkast perst ditzelfde gas samen tot een vloeistof en er komt warmte vrij. Deze warmte wordt afgegeven aan koelbuizen. Dat samenpersen van gas de temperatuur verhoogt, voel je aan het oppompen van je fietsband: het ventiel wordt warm.



1.11 Een warmtepomp: de koelkast

Een koelkast pompt als het ware de warmte van binnen naar de achterzijde. De totale hoeveelheid energie – elektrische en warmte-energie samen – blijft hierbij gelijk. Een koelende *airconditioner* in huis of kantoor doet feitelijk hetzelfde. Hierbij plaats je de compressor en de koelbuizen buiten de te koelen ruimte, bijvoorbeeld op het dak.

Omgekeerd aan een koelkast, kun je een huis verwarmen met een *warmtepomp*. Feitelijk koel je de grote buitenwereld af en plaatst de warme compressor in de te verwarmen ruimte. Warmtepompen bestaan al tientallen jaren en worden in vele landen gebruikt. Om te kunnen functioneren, verbruikt een warmtepomp elektriciteit, afkomstig van het energiebedrijf of eventueel van zonnepanelen. Een warmtepomp kan vaak ook gebruikt worden als koelende *airconditioner*. Het is een grote ingreep als je thuis je gasverwarming wilt laten vervangen door een warmtepomp.

Een warmtepomp is een 'omgekeerde' koelkast en verbruikt elektriciteit.

## Transport van brandstoffen

Fossiele brandstoffen zoals aardolie, stookolie en benzine, zijn vloeibaar en kunnen in tankers of – in geval van benzine – in een tank van je auto worden vervoerd. Het voordeel van een vloeistof – ten opzichte van een gas – is dat de moleculen dicht bij elkaar zitten. Een volume brandbare vloeistof kan daardoor meer energie bevatten dan eenzelfde volume sa-

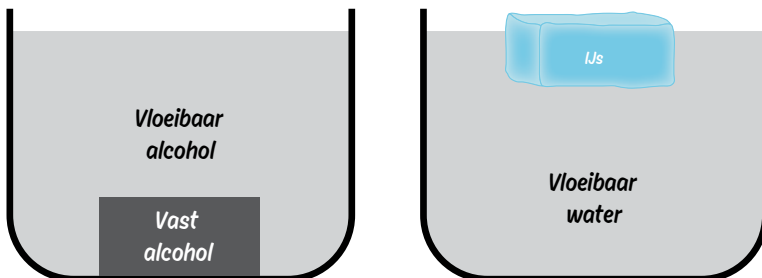
mengeperst gas. Een vloeistof heeft een grotere *energiedichtheid* dan een gas.

Sommige brandbare gassen – zoals propaan en butaan – kun je bij omgevingstemperatuur vloeibaar maken, bijvoorbeeld in *campinggas*. Sommige gassen – zoals waterstofgas  $H_2$  – kun je alleen geforceerd en met speciale koelapparaten bij hele lage temperaturen vloeibaar maken. Waterstof wordt pas bij minus 253 °C vloeibaar, dus 253 graden onder nul. Een personenauto op vloeibaar watergas laten rijden is daarmee onmogelijk. Je kunt het gas slechts samenpersen en niet vloeibaar maken. Een vloeistof is compact en bevat in hetzelfde volume meer moleculen dan een gas en kan daardoor meer energie dragen. Het geforceerd afkoelen en vloeibaar maken van waterstofgas bij -253 °C kost veel energie.

### IJs drijft!

Vrijwel alle stoffen die warmer worden zetten uit. In een ouderwetse kwikthermometer zet het vloeibare *kwik* bij hogere temperatuur uit en neemt meer ruimte in, zodat je de hogere temperatuur op de schaal kunt aflezen.

Bij afkoeling stolt een vloeistof doordat zijn moleculen minder bewegen en minder ruimte innemen. Een stof in vaste vorm is compacter dan een vloeistof. Vaste stoffen *zinken* daarom in hun eigen vloeistof. Het vaste, gestolde alcohol links in 1.12 rust daarom op de bodem van de vloeistof. Wellicht druist dit in tegen je intuïtie, want het ons welbekende ijs drijft juist op water: water is een uitzondering! Als je vloeibaar water afkoelt tot beneden 4 graden Celsius dan krimpt het niet meer, maar zet het ineens uit. Dat komt doordat watermoleculen zich beneden die temperatuur gaan ordenen. Hierdoor nemen ze onverwacht meer ruimte in en zet het water uit. Bevroren water – ijs dus – is daarom lichter dan vloeibaar water. Dat vreemde watergedrag zorgt ervoor dat ijs drijft op vloeibaar water (zie 1.12). Als dat ijslaagje voldoende dik is, kun je erop schaatsen.



1.12 Vaste stoffen liggen op de bodem, behalve bij ijs

Was water niet zo eigenzinnig, dan zou ons klimaat er flink anders uitzien. Er zou – helaas voor de ijsberen – geen drijvend poolijs meer zijn. Het ijs zou op de bodem liggen van de zee. Zonlicht wordt door ijsbergen, sneeuw en gletsjers terug de ruimte in gekaatst. Bij verdwijning van deze witte massa, zou zonlichtenergie niet worden terugkaatst en zou de aarde (nog) meer opwarmen.

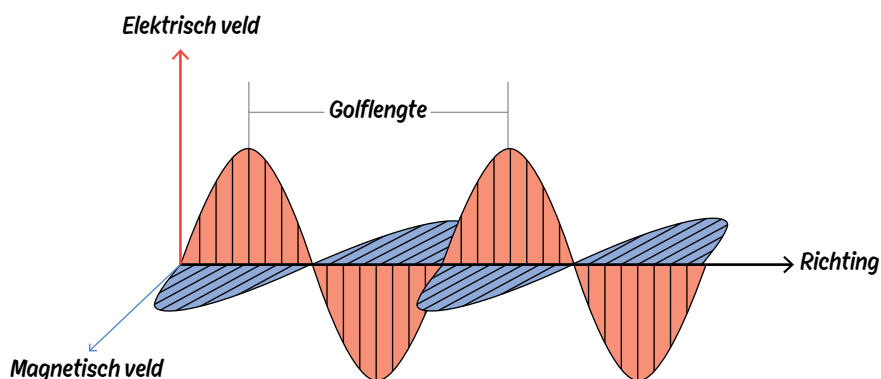
Smeltend *drijfj* in een ijsberg op de noordpool doet trouwens de zeespiegel niet stijgen. Het smeltwater past – volgens de natuurwet van *Archimedes* – precies in de ruimte die de ijsberg onder water inneemt.

Groenland, Antarctica en gletsjers bevatten immense massa's *landijs*. Als dat smelt, stijgt de zeespiegel meer dan zestig meter.<sup>7</sup>

Smeltend drijfj (ijsbergen, schotsen) verhoogt de zeespiegel niet.  
Smeltend landijs (Groenland, Antarctica, gletsjers) verhoogt de zeespiegel wel.

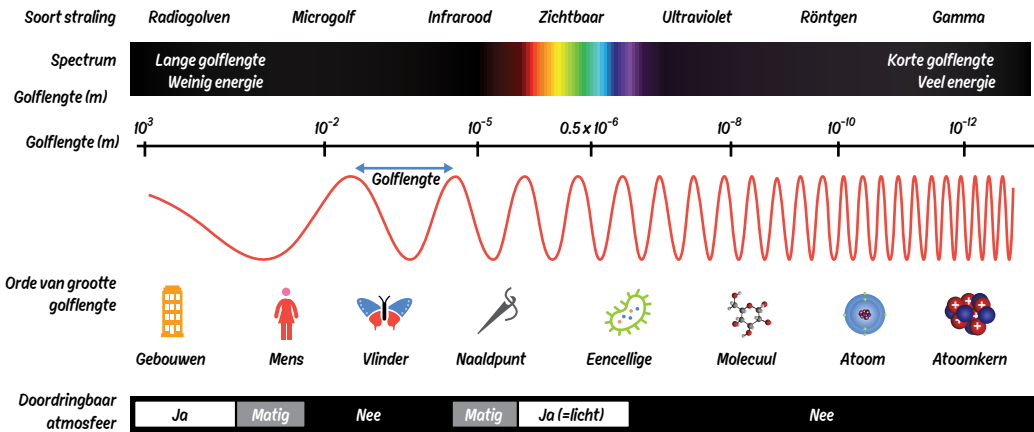
## Licht is elektromagnetische straling

Je kunt je omgeving zien omdat je ogen gevoelig zijn voor bepaalde *elektromagnetische golven* (zie 1.13).



1.13 Elektromagnetische golf

De voor de mens zichtbare straling noemen we *licht*. Het zichtbare deel van zonlicht is wit en bestaat uit de kleuren rood, oranje, geel, groen, blauw, indigo en violet; uiteraard precies de kleuren van de *regenboog*. In 1.14 zie je deze kleuren in het zichtbare deel van het *spectrum*.<sup>8</sup>



1.14 Het elektromagnetisch spectrum

In het spectrum vind je ook elektromagnetische golven die niet met het menselijk oog waar te nemen zijn. Links in het spectrum vind je straling met weinig *energie* met een lange golflengte van bijvoorbeeld één kilometer ( $10^3$  meter), de orde van grootte van een wolkenkrabber. Naar rechts in het spectrum wordt de golflengte steeds kleiner en bevat de straling steeds meer *energie*. Geheel rechts vind je straling met veel energie met een golflengte in de orde van grootte van een atoomkern van  $10^{-12}$  meter.

Alle elektromagnetische golven reizen met de *lichtsnelheid* van 300.000 km per seconde. Als een satelliet om de aarde met de snelheid van het licht kon reizen, kwam hij in één seconde ongeveer zeven keer voorbij. Alle elektromagnetische golven zijn in staat door het vacuüm van de ruimte te reizen, maar niet alle straling bereikt het aardoppervlak. In 1.14 (onderin) zie je welke straling uit de ruimte het aardoppervlak kan bereiken. Gelukkig worden schadelijke soorten straling rechts in het spectrum tegengehouden door de atmosfeer.

Van links naar rechts in 1.14 toont het spectrum verschillende soorten straling.

- *Radiogolven* zijn de dragers van radio-, televisie- en telefoonsignalen. Deze golven dringen gemakkelijk door de atmosfeer. Deze straling bevat weinig energie en – omdat ze geen interactie aangaat met moleculen in ons lichaam – is ze onschadelijk voor de mens.
- *Microgolven* kennen we van radar op schepen en de magnetron. In de magnetron brengt deze straling watermoleculen in een snellere beweging. Snellere moleculen betekent automatisch een hogere

temperatuur, zodat je waterhoudend voedsel warm kunt maken. Microgolven dringen matig door de atmosfeer heen. De microgolven in een magnetron (maar niet daarbuiten) zijn schadelijk voor de mens.

- *Infrarode straling* wordt wel *warmtestraling* genoemd. *Broeikasgassen* zoals koolstofdioxide  $\text{CO}_2$  en methaan  $\text{CH}_4$  absorberen infrarode straling afkomstig van het aardoppervlak en stralen deze ingevangen warmtestraling weer uit naar alle kanten, inclusief het aardoppervlak. Hierdoor wordt het broeikaseffect veroorzaakt.
- *Zichtbaar licht* kunnen we met onze ogen zien. Wit licht bestaat uit alle kleuren van de regenboog. Zichtbaar zonlicht dat op een witte ondergrond valt, wordt teruggekaatst. In een wit shirt heb je daarom minder last van de warmte van de zon. Het licht van de zon dat op ijsmassa's – zoals Groenland en Antarctica – bij de polen valt, wordt direct weerkaatst terug naar de ruimte. Echter, zichtbaar licht dat op een donkere ondergrond valt, wordt geabsorbeerd en warmt de ondergrond op. De ondergrond zendt dit als infrarode warmtestraling uit.
- *Ultraviolet licht (uv)* is onzichtbaar en bevat meer energie dan zichtbaar licht. Tegen dit schadelijke (zon)licht beschermt je huid zich door bruin pigment te maken. Van te veel zonlicht kun je huidkanker krijgen. Zonnebrandcrème beschermt tegen verbranden doordat het uv-licht tegenhoudt.
- *Röntgenstraling* is ontdekt door de Duitser Wilhelm Röntgen. In het Engels heten deze stralen *X-Ray's*. Met deze straling – ook gebruikt in een CT-scanner in een ziekenhuis – kunnen beelden worden gemaakt van het 'binnenste' van het menselijk lichaam. Deze straling is schadelijk en moet met zorg worden gebruikt.
- *Gammastraling* wordt ook wel *radioactieve straling* genoemd en bevat de meeste energie. Het is schadelijk, omdat het atomen van het DNA kan veranderen. Hierdoor veranderen de erfelijke eigenschappen van een cel en kan *kanker* ontstaan. *Kosmische straling* afkomstig van de zon is ook straling met veel energie. De meeste kosmische straling wordt door de atmosfeer tegengehouden.