

EIGENSCHAPPEN VAN STOFFEN EN MATERIALEN

NNV18

De natuur is fascinerend. Natuurkunde wordt gedreven door die fascinatie en probeert de wereld waarin we leven te doorgronden en te beschrijven. Stoffen en materialen zijn in die wereld ongetwijfeld het meest tastbare onderdeel. Geen wonder dat we al sinds mensenheugenis willen weten hoe stoffen en materialen in elkaar steken. Om onze nieuwsgierigheid te bevredigen, maar ook om stof- en materiaaleigenschappen optimaal te kunnen gebruiken bij het maken van de scherpste bijlen en speerpunten, of de snelste computers en de hipste mobieltjes.



In de kantlijn van de tekst staat af en toe dit pictogram. Dat geeft aan dat je op www.schoolsupport.nl/ninaweblinks een link naar een webpagina of andere informatie kunt vinden. De links op deze NiNaweblinks-pagina worden zoveel mogelijk up to date gehouden.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	M.P. Huijbregtse, J.H. van der Schee, J.S. Seldenthuis
M.m.v.	J.E. Frederik, M. van de Kragt, A. Moerdijk, D.A. van de Straat, J.M. Thijssen
Vormgeving	Loran de Vries
Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	april 2012

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2012

Alle rechten op het lesmateriaal dat voor de pilot Nieuwe Natuurkunde ontwikkeld is, zijn voorbehouden aan de Stichting natuurkunde.nl. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins, voor al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten;
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt en/of verder ontwikkeld, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:

1. schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, met als contactadres de Nederlandse Natuurkundige Vereniging: verenigingsmanager@nnv.nl

2. bij hergebruik of verspreiding wordt door de gebruiker de bron correct vermeld, en de licentievoorzaken van dit werk kenbaar gemaakt.

Voor zover de Stichting natuurkunde.nl gebruik maakt van extern materiaal heeft zij getracht toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan wordt u verzocht contact op te nemen met: verenigingsmanager@nnv.nl.

Het lesmateriaal is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. de auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de modules, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze modules.

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	5
1.1	Ruimtevaart	5
1.2	Stofeigenschappen	6
1.3	Van experiment naar theorie	6
	Opgaven	7
2	Het zijn de kleine dingen die het doen	9
2.1	Deeltjesmodellen	9
2.2	Een eenvoudig model	11
	Opgaven	11
3	Gassen: stoffen op z'n simpelst	12
3.1	De wet van Boyle	12
3.2	Kinetische gastheorie – kwalitatief	13
3.3	Kinetische gastheorie – kwantitatief	13
3.4	Absolute temperatuur	16
3.5	De algemene gaswet	17
3.6	Temperatuur als maat voor beweging	19
3.7	De wet van Avogadro	21
3.8	Zwaartekracht en de atmosfeer	21
3.9	De deeltjes in de atmosfeer	22
3.10	Terugblik	23
	Opgaven	24
4	Fasen en hun overgangen	31
4.1	Ideale en reële gassen	31
4.2	Van der Waalskrachten	31
4.3	Vaste stoffen	32
4.4	Vloeistoffen	33
4.5	Verdamping	33
4.6	Verzadigde dampdruk	34
	Opgaven	34
5	Nog meer temperatuureffecten	37
5.1	Uitzetten en krimpen	37
5.2	Water: een geval apart	38
5.3	Warmtegeleiding	39
5.4	Warmtecapaciteit	40
	Opgaven	42
6	Moderne ontwikkelingen	48
6.1	Korte terugblik	48
	Groepsopdracht	48
6.2	Vloeibare kristallen	48
6.3	Zelfherstellende materialen	49
6.4	Granulaire materie	50
6.5	Hotpads	50
6.6	Piëzokristallen	51
	Antwoorden op enkele opgaven	52

Bijlage A Appletopdrachten	53
A.1 Wet van Boyle	53
A.2 Algemene gaswet	53
A.3 De atmosfeer	54
A.4 Faseovergangen van de elementen	54
A.5 Afkoelen	54
A.6 Verdampen	55
A.7 Extra	55
Bijlage B Practica	56
B.1. Grootte van een oliedeeltje	56
B.2 Intermoleculaire ruimte	56
B.3 Brownse beweging en vrije weglengte	57
B.4 Gay-Lussac	58
B.5 Hoogtemeter	59
B.6 Uitzetting van een staaf	59
Bijlage C Procesbeschrijving groepsopdrachten	60
C.1 Werkverantwoording proces	62
C.2 Werkverantwoording algemene vaardigheden	63
C.3 Werkverantwoording resultaat	64

Globale opbouw van een paragraaf

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De *belangrijkste leerstof* is weergegeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

Pas op! Veel leerlingen voor jou hebben moeite gehad met onderwerpen die in **rode** tekstvakken nog eens extra aandacht krijgen. Zodat jij niet meer in deze **valkuilen** zult vallen!

In **groene** tekstvakken vind je **extra** uitleg, niet verplicht voor de toets, maar wel een interessante aanvulling op de tekst.

1 Inleiding



Hoofdstukwag

Vakcode

Extra - bimetaal

Waarom een module over eigenschappen van stoffen en materialen?

Tijdens voorlessen kan het je herfug van toe gaan. Van inges tot gloeiende harte en gisanteke harte, en in alle harte. Het harte ontdekt en vragt om eutieve materialen. Een kleine eutieve omhete, het harte rijp...

Absolute temperatuur

Met behulp van onder meer vergelijking kunnen Celsius- en absolute temperatuur van elkaar omgezet worden.

$$T_c = T_f + 273,15 \quad \text{of} \quad T_f = T_c - 273,15$$

Symbolen: T_f is de (absolute) temperatuur in Fahrenheit $^{\circ}\text{F}$, T_c is de (Celsius) temperatuur in graden Celsius $^{\circ}\text{C}$.

Bij het omrekenen van Celsius naar Fahrenheit vallen we vaak prg bij de Celsius-temperatuur op $1,8 \times T_c + 32$. Dit is een eenvoudige berekening.

Vol een magneet buigt tot de helft met water en gooit de een perpendic. In. Het vervolgens heel voochtig, alhoewel hij, tot de buis tot aan de rand geruik (er mag het een, een kop op zitten). Als je het voochtig doet, zal de alhoewel buigepst het wel heel kleine dierren conde te voochtig.

Druk nu het stee in het stee, en voochtig het stee met het stee in het voochtig. Als het goed is stigt nu de alhoewel meten. In het stee con-hoog.

Hoogte van de atmosfeer

Vraag: Bereken de hoogte van de atmosfeer, uitgaande van de vergelijking $p = \rho \cdot g \cdot h$. Stroom: $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$ (101325 Pa). Wat is de werkelijke hoogte?

Antwoord:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \rho_{\text{Luft}} = 1,293 \text{ kg/m}^3 \text{ en } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,293 \cdot 9,81} = 8334 \text{ m}$$



**Belangen
geve
Deze
mee te**

**Een g
In
voor
rader**

Belangrijke nieuwe **vergelijkin-**
gen uit de natuurkunde zijn aan-
gegeven in **blauwe** tekstvakken.
Deze heb je nodig om rekenwerk
mee te kunnen verrichten.

Een goed voorbeeld doet goed volgen!
In **blauwe** tekstvakken worden **voorbeelden** van berekeningen en redeneringen gegeven, zodat je ziet hoe je een opgave aan kunt pakken.

In het **blauwe** tekstvak ‘**Opgaven**’ staan de opgaven die je na het lezen van de tekst kan gaan maken

In het **blauwe** tekstvak “**Begrippen**” staan belangrijkste termen uit de tekst

[illegible]

Volg de genoemde link in het **gele** tekstvak “**Internet**” en krijg meer uitleg bij een stuk tekst aan de hand van een filmpje of applet.

In het **blauwe** tekstvak ‘**Samenvatting**’ staat wat je moet weten en kunnen.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf. Enkele opgaven staan uitgewerkt op p53.

1 Inleiding

Hoofdstukvraag	Waarom een lessenserie over eigenschappen van stoffen en materialen?
----------------	--

Tijdens ruimtereizen kan het er heftig aan toe gaan. Van ijzige kilte tot gloeiende hitte en gigantische krachten en snelheden. Extreme omstandigheden vragen om extreme materialen. Een kleine onvolkomenheid kan fataal zijn...

1.1

Ruimtevaart

Internet



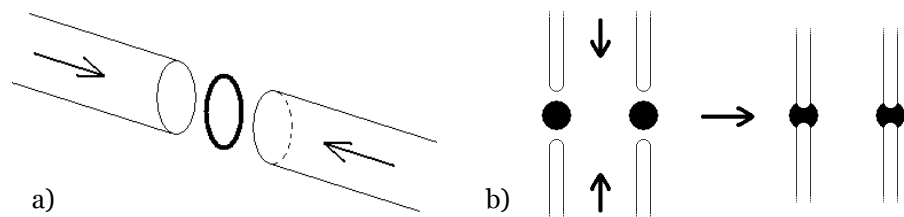
In het onderstaande filmpje zie je het trieste lot dat de Challenger ten deel viel: [YouTube: Challenger Explodes](#).



Figuur 1.1 Met de Challenger space shuttle gaat het gruwelijk mis.

Op 28 januari 1986 ging het gruwelijk mis. De Amerikaanse space shuttle Challenger explodeerde 73 seconden na de lancering (figuur 1.1). De voltallige bemanning kwam om het leven.

Een rubberen O-ring, gebruikt om de stuwraketten mee af te dichten, bleek niet bestand tegen de lage temperaturen op de dag van de lancering. Hete gassen lekten weg en kwamen in contact met de externe brandstoftanks. De tanks, niet berekend op de hitte, bezweken en het opgesloten waterstof en zuurstof kregen vrij spel om met elkaar te reageren. Een razendsnelle verbranding later bleven er van de Challenger slechts brokstukken over...



Figuur 1.2

a) Een O-ring wordt tussen twee buizen geklemd.

b) Doorsnede waarbij de luchtdichte afsluiting zichtbaar wordt.

Extra - O-ring

Een O-ring is een cirkelvormig stuk rubber, dat gebruikt wordt om luchtdichte afsluitingen te maken (figuur 1.2). Je vindt ze in space shuttles, maar ook dichterbij huis: in het deksel van jam- of appelmoespotten zit bijvoorbeeld een O-ring verwerkt voor een vacuümsluiting.

Op 1 februari 2003 kreeg de Amerikaanse ruimtevaart een nieuwe schok te verwerken. Zestien dagen eerder was de space shuttle Columbia met succes de ruimte ingestuurd voor een onderzoeksmissie. De terugkeer in de aardse dampkring verliep een stuk minder succesvol.

Enorme wrijving bij het binnentreden van de dampkring doet de temperatuur rond een space shuttle tot vele duizenden graden Celsius oplopen. Normaal biedt een hitteschild hier bescherming tegen, maar vlak na de lancering van de Columbia had een losgelaten stuk isolatieschuim een gat in het hitte-

schild geslagen. Bij het betreden van de dampkring kreeg de hitte kans via die zwakke plek de shuttle binnen te dringen. Al snel raakte de shuttle onbestuurbaar en enkele ogenblikken later barstte ook de Columbia in stukken uiteen. Geen van de bemanningsleden heeft het ongeval overleefd.



1.2

Figuur 1.3 Twee fasen water in een glas.

Extra

De aanduidingen 'stof' en 'materiaal' worden nogal eens door elkaar gebruikt. Maar wat is eigenlijk het verschil? In principe kan het geen kwaad om alles met 'stof' aan te duiden. Wanneer de stof echter bewust ergens toegepast wordt, spreken we meestal van een materiaal. We halen bijvoorbeeld uit mijnen de stof goud, dat als materiaal dient voor het maken van sieraden.



Figuur 1.4 Kan een banaan dit aan?

1.3

Stofeigenschappen

Uit de voorbeelden in de vorige paragraaf blijkt hoe belangrijk materiaalkeuze kan zijn. Mensenlevens staan op het spel! Maar ook in minder extreme gevallen speelt de keuze voor geschikte materialen een grote rol. Een regenjas die niet waterafstotend is, zal bijvoorbeeld weinig succes hebben. En wat dacht je van een kaasschaaf van rubber?

We kunnen ook zeggen: rubber heeft niet de juiste eigenschappen om er een kaasschaaf van te maken. **Stofeigenschappen** zorgen ervoor dat we stoffen van elkaar kunnen onderscheiden. Er zijn ontzettend veel stofeigenschappen te bedenken. Wat dacht je van kleur, geur en smaak bijvoorbeeld? Maar ook dichtheid, smeltpunt en soortelijke weerstand. Afijn, te veel om op te noemen.

Door te experimenteren, kun je achterhalen welke eigenschappen een stof bezit. Soms is daar ingewikkelde apparatuur voor nodig, maar soms is het al voldoende om even naar buiten te kijken. Naar het water in de sloten bijvoorbeeld: 's zomers is het een kabbelende vloeibare massa en 's winters ligt er – met een beetje geluk – een harde laag ijs. Blijkbaar heeft water de eigenschap dat het in verschillende vormen kan voorkomen, die we natuurlijk kennen als **fasen**.

Verdere experimenten kunnen je leren hoeveel fasen er zijn, onder welke omstandigheden een overgang tussen fasen plaatsvindt en wat nou de verschillen tussen de fasen zijn. Je kunt erachter komen of en hoe water elektriciteit geleidt. Of warmte.

Met genoeg geduld en de juiste apparatuur kun je door te blijven experimenteren de eigenschappen van water achterhalen – en natuurlijk ook van alle andere stoffen.

Internet

Uit sommige experimenten leer je verrassende eigenschappen kennen. Wist jij dat je met een banaan een spijker in een plank kunt slaan (figuur 1.4)?



[YouTube: Pounding a Nail with a Frozen Banana](#)

Van experiment naar theorie

Experimenteren alleen is niet voldoende. Vaak willen we namelijk niet alleen weten *wat* de eigenschappen van een stof zijn, we willen ook weten *waarvoor* een stof die eigenschappen heeft. Kortom, we willen stofeigenschappen kunnen *verklaren*. Om prangende vragen te beantwoorden – “waarom zijn waterstof en zuurstof gassen en is water een vloeistof?” – maar ook om betere keuzes te kunnen maken met het oog op toepassingen.

In deze lessenserie zullen we stofeigenschappen zowel vanuit experimenteel als theoretisch oogpunt bekijken. Natuurlijk is het onmogelijk om alle stofeigenschappen te behandelen. Niet alleen zijn het er ontzettend veel, van een heleboel stofeigenschappen is de theoretische verklaring ook nog eens behoorlijk ingewikkeld. We zullen ons dan ook richten op een select groepje eigenschappen, dat relatief eenvoudig te verklaren is.

Om die eigenschappen te verklaren, kijken we naar het gedrag van die stoffen zoals we ze van buiten kunnen waarnemen en naar het gedrag van hun moleculen. Zo gaan we onder andere in op de volgende vragen:

- Waardoor kennen stoffen verschillende fasen?
- Hoe gedragen gassen zich?
- Waardoor zetten stoffen uit als we ze verwarmen?
- Hoe gaat warmtegeleiding in zijn werk?

Het zijn dit soort vragen die we in de komende hoofdstukken zullen beantwoorden.

<i>Begrippen</i>
Stofeigenschappen Fasen

<i>Samenvatting</i>
Je kunt: • een relatie leggen tussen stofeigenschappen en de functie die de stof in een gegeven toepassing heeft; • het belang van kennis van stof- en materiaaleigenschappen aan de hand van voorbeelden toelichten; • stofeigenschappen van verschillende stoffen met elkaar vergelijken.

Opgaven

§1.2

1 Verschillen en overeenkomsten

- a. Noem twee verschillen in eigenschappen tussen:
 - Goud en aluminium
 - Water en terpentine
- b. En twee overeenkomsten?

2 Stofeigenschappen in BINAS

- a. Zoek in BINAS vijf stofeigenschappen op. Welke kun je vinden en in welke tabel staan ze?
- b. Vergelijk de door jou gevonden eigenschappen met die van jouw buurman of -vrouw. Welke andere eigenschappen heeft hij/zij kunnen vinden?

3 Het juiste materiaal

- a. Noem een drietal eigenschappen dat het materiaal voor een colafles volgens jou moet hebben.
 - b. Zoek in BINAS op wat de beste geleider is van elektrische stroom.
 - c. Stroomdraden worden meestal van koper gemaakt. Bedenk waarom ze niet worden gemaakt van het materiaal dat je bij b) gevonden hebt.
-

2 Het zijn de kleine dingen die het doen

Hoofdstukvraag	Hoe kunnen we de opbouw van stoffen modelleren?
----------------	---

Alle materie in de wereld om ons heen en wijzelf bestaan uit kleine deeltjes. Moleculen, atomen, elektronen... we praten over deze deeltjes alsof ze bestaan. Toch heeft nog nooit iemand er een van gezien en dat zal ook nooit gaan gebeuren. Althans: niet met het blote oog en ook niet met een lichtmicroscop. Alleen met heel geavanceerde apparaten, zoals de scanning tunneling microscope, kunnen we ze waarnemen. Waarom zijn we toch zo overtuigd van het bestaan van deze minuscule deeltjes? Omdat we er een hoop waarnemingen mee kunnen verklaren!

2.1

Deeltjesmodellen

Extra - Democritus

Al in de 4e eeuw voor Christus opperde de Griek Democritus dat stoffen waren opgebouwd uit kleine deeltjes. Hij noemde deze deeltjes 'atomen' – niet te verwarren met wat we daar tegenwoordig onder verstaan – naar het Griekse woord atomos dat 'ondeelbaar' betekent. Hoewel zijn redeneringen meer filosofisch dan wetenschappelijk van aard waren, wordt Democritus gezien als de grondlegger van het deeltjesmodel. In zijn tijd kregen zijn ideeën echter weinig bijval, en het zou nog zo'n tweeduizend jaar duren voordat het deeltjesdenken echt van de grond kwam. En nu? *Everything is made of atoms!*

Een goed model is zo eenvoudig mogelijk, maar realistisch genoeg om een verklaring te geven van waargenomen feiten. Vaak bevat een model elementen die een verband leggen met iets dat al bekend is. Bijvoorbeeld, de voorstelling van een atoom als een knikker of biljartbal. Dat helpt niet alleen het voorstellingsvermogen, maar het is ook een bewuste strategie in de natuurkunde om bestaande kennis zo efficiënt mogelijk te gebruiken.

Voor theorieën over stoffeigenschappen worden modellen van de opbouw van stoffen gebruikt. Lange tijd kwamen mensen niet verder dan een **continuümmodel**: het idee dat alle stoffen continu en oneindig vaak deelbaar zijn. Een 'kleinste stukje' van een stof bestond in hun ogen niet. Ook nu nog wordt dit model vaak gebruikt in toepassingen zoals berekeningen aan stromingen van lucht en vloeistoffen. Voor de bestudering van deze verschijnselen zijn alleen direct meetbare eigenschappen zoals druk, temperatuur, etcetera van belang.

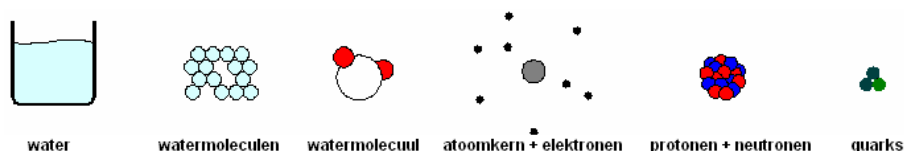
Na de Middeleeuwen begon er verandering te komen in de ideeën over de stoffelijke wereld. Door experimenten kwamen nieuwe verbanden aan het licht en voor de verklaring van deze ontdekkingen bleek het continuümmodel steeds vaker ontoereikend. Een heel ander idee bood uitkomst: het idee dat stoffen zijn opgebouwd uit minuscule deeltjes en er dus wél een kleinste stukje van een stof bestaat.

We noemen dit idee in het algemeen een **deeltjesmodel**. De eerste deeltjesmodellen waren nogal simpel van aard: elke stof zou zijn opgebouwd uit kleine, ondeelbare bolletjes. Toch kon hiermee al een groot aantal stoffeigenschappen in ieder geval kwalitatief verklaard worden. Te denken valt aan het gedrag van gassen, het bestaan van fasen en faseovergangen en temperatuureffecten als uitzetten en warmtegeleiding. De meeste natuurkundige

stofeigenschappen die hieronder besproken worden kunnen verklaard worden met dit deeltjesmodel.

Het model van ondeelbare bolletjes is echter niet in staat om bijvoorbeeld scheikundige reacties mee te verklaren, waarbij stoffen overgaan in andere stoffen. De deeltjes zouden dan tóch deelbaar moeten zijn en zo kwam men tot moleculen die zelf weer bestaan uit atomen (figuur 2.1).

Later moesten ook atomen eraan geloven als kleinste bouwstenen. Om onder andere elektrische verschijnselen te verklaren waren nóg kleinere deeltjes nodig. Op deze manier ontstond aan het begin van de 20^e eeuw het beeld van het atoom opgebouwd uit een aantal negatief geladen elektronen rond een positief geladen kern. Hiermee kon o.a. het periodiek systeem van de elementen en de chemische eigenschappen van stoffen verklaard worden. Op deze manier zijn de deeltjesmodellen in de loop van de geschiedenis steeds complexer geworden. Met deze modellen kunnen steeds meer stofeigenschappen verklaard worden en komen er steeds geavanceerdere toepassingen.



Figuur 2.1 Steeds kleiner...Water als voorbeeld van de ontwikkeling van deeltjesmodellen. Let op dat de kleur van de deeltjes geen betekenis heeft!

Extra - Dieper in de deeltjesfysica

Hoewel de deeltjesmodellen door de eeuwen heen steeds complexer zijn geworden, zijn ze in zekere zin ook eenvoudiger geworden. Het overzicht is met name de laatste decennia sterk toegenomen. Hadden de eerste deeltjesmodellen nog voor elke stof een ander soort deeltje nodig, tegenwoordig denken we te weten dat er slechts twee 'families' van deeltjes zijn. We noemen ze 'leptonen' en 'quarks'. Het bekendste lepton is het elektron, terwijl de zogenaamde up- en down-quarks de bouwstenen van protonen en neutronen zijn*. Zo hebben we nu eigenlijk aan een drietal deeltjes genoeg!** De miljoenen manieren waarop deze deeltjes kunnen combineren zorgen uiteindelijk voor de gevarieerde hoeveelheid stoffen om ons heen.

* Een proton bestaat uit twee up-quarks en één down-quark. Twee down-quarks en één up-quark vormen een neutron.

** De overige leptonen en quarks komen in de 'gewone' natuur nauwelijks voor, maar worden voornamelijk geproduceerd onder extreme omstandigheden in een laboratorium of in de uit hoeken van het heelal.

Practicum - De grootte van een oliedeeltje

Om een indruk te krijgen van de afmetingen van 'deeltjes', ga je in dit practicum proberen de grootte van een oliemolecuul te bepalen. "Onmogelijk", zul je denken. Maar zelfs met een eenvoudige 'huis-tuin-en-keuken-aanpak' kun je tot een behoorlijke schatting komen! Zie de handleiding in bijlage B.1.

2.2

Een eenvoudig model

Het heeft weinig zin om direct de meest moderne en ingewikkelde deeltjesmodellen in te duiken. We beginnen bij het begin. In de komende hoofdstukken zullen we dan ook teruggaan naar de Middeleeuwen; de tijd waarin ‘deeltjes’ nog werden gezien als minuscule ondeelbare bolletjes. Zoals we zullen zien zijn met dit eenvoudige deeltjesmodel al een hoop eigenschappen en verschijnselen te verklaren. En dat is precies wat we gaan doen!

Practicum - Intermoleculaire ruimte

Ondeelbare bolletjes als bouwstenen van stoffen? Dat gaan we bekijken met behulp van knikkers. Zie de handleiding in bijlage B.2.

Begrippen

Model
Continuümmodel
Deeltjesmodel

Samenvatting

Je kunt:

- het nut van het gebruik van modellen toelichten;
- twee modellen noemen die gebruikt worden bij het verklaren van eigenschappen van materie;
- voorbeelden noemen van verschijnselen, die niet met een atoommodel van ondeelbare deeltjes verklaard kunnen worden.

Opgaven

4 Uitspraken over deeltjes

Geef van de onderstaande uitspraken aan of ze juist of onjuist zijn. Verbeter de onjuiste uitspraken.

- a. De ruimte tussen atoomkern en elektronen is gevuld met lucht.
- b. De moleculen in een vloeistof bewegen alleen als de vloeistof stroomt.
- c. Als water bevroren is tot ijs, bewegen de moleculen niet meer.
- d. Een watermolecuul ziet er hetzelfde uit als een ijsmolecuul.
- e. 10 atomen kunnen zwaarder zijn dan 20 atomen.
- f. Als de temperatuur maar lang genoeg hetzelfde blijft, stopt de beweging van moleculen.

3 Gassen: stoffen op z'n simpelst

Hoofdstukvraag	Hoe gedragen gassen zich en hoe is dat te verklaren?
----------------	--

In dit hoofdstuk laten we zien hoe het deeltjesmodel de waargenomen eigenschappen van gassen verklaart. Op het eerste gezicht lijken stoffen in de gasfase misschien het lastigst van allemaal. Ze zijn immers moeilijk 'vast te pakken' en vaak kun je ze niet eens zien, ruiken of proeven. Met de ontwikkeling van vacuümtechnieken in de 16e en 17e eeuw bleken gassen echter verrassend goed hanteerbaar voor experimenten en verrassend eenvoudig qua eigenschappen!

3.1 De wet van Boyle



Figuur 3.1
Robert Boyle

Een van de onderzoekers van gassen in de 17^e eeuw was de Ierse wetenschapper Robert Boyle (figuur 3.1). Bekend was dat opgesloten gassen druk uitoefenen op de wanden van het volume waarin zij zitten opgesloten. Boyle onderzocht voor verschillende gassen het verband tussen die druk en de grootte van dat volume. Hij hield de temperatuur van het gas daarbij constant en zorgde ervoor dat er geen gas kon ontsnappen of werd toegevoegd. Na lang en nauwkeurig meten kwam hij voor *alle* gassen tot de volgende vergelijking:

Wet van Boyle

De wet van Boyle geeft het verband tussen het volume waarin een gas zit opgesloten en de druk die het gas op de wanden van dat volume uitoefent:

$$p \cdot V = \text{constant}$$

Symbolen: p is de druk in Pascal (Pa), V is het volume in kubieke meters (m^3).

Geldigheid: deze vergelijking geldt bij een constante temperatuur en een constante hoeveelheid gasdeeltjes.

Wat was druk ook al weer? Druk is kracht gedeeld door oppervlak, of kracht per oppervlak (per betekent eigenlijk gewoon gedeeld door!).

$$p = \frac{F}{A}$$

Symbolen: A is oppervlak in vierkante meters (m^2), p is de druk in Pascal (Pa) en F is de kracht in Newton (N).

Opgaven

Je kunt nu opgaven 5 en 6.

3.2



Figuur 3.2 Daniel Bernoulli

Kinetische gastheorie – kwalitatief

Hoe kunnen we de wet van Boyle verklaren? Daarvoor gaan we gebruikmaken van het deeltjesmodel: gassen zijn opgebouwd uit kleine ondeelbare bolletjes. Een kleine eeuw na Boyle gebruikte de Zwitser Daniel Bernoulli dit model al (figuur 3.2). Hij voegde er wel een extraatje aan toe: de deeltjes bewegen kriskras door elkaar heen. De druk die een gas uitoefent op de wanden van een gasfles zou komen door botsingen van de deeltjes met die wanden. We noemen deze theorie de **kinetische gastheorie**.

Kwalitatief lijkt de kinetische gastheorie in orde: bij een gelijkblijvend aantal gasdeeltjes betekent een kleiner volume dat de deeltjes vaker met de wanden botsen en de druk daardoor toeneemt. Precies wat de wet van Boyle zegt. Maar het mooie van dit model is dat ook *kwantitatief* kan worden aangetoond dat de wet van Boyle eruit voortvloeit.

In de natuurkunde wordt dit een **micro-macroverband** genoemd: de macroscopische, meetbare eigenschap gasdruk worden verklaard uit de microscopische, onmeetbare botsingen van kleine gasdeeltjes met elkaar en de wanden van een volume. De indrukwekkende kracht van deeltjesmodellen zal nog blijken.

Extra

In het natuurkundige spraakgebruik heeft 'macro' de betekenis 'groot', d.w.z. alles wat met het blote oog zichtbaar is. Micro betekent dan klein, alles wat alleen met een microscoop te zien is of nog kleiner. Bijvoorbeeld atoomstructuren met afmetingen van nanometers worden aangeduid als microscopisch.

Internet

Bekijk de applet op [NiNa lesmateriaal: Stoffen en materialen](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.1.

Practicum - Brownse beweging

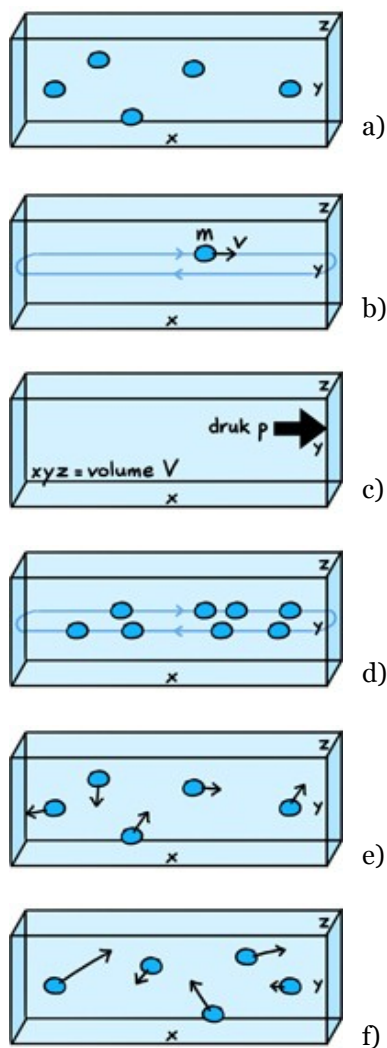
Aan het begin van de 19e eeuw deed de Schotse botanist Robert Brown een bijzondere ontdekking. Wat dat was? Ontdek het zelf in dit practicum! Zie de handleiding in bijlage B.3.

3.3

Kinetische gastheorie – kwantitatief

Om de kwantitatieve afleiding te kunnen maken, moeten we het kinetisch gasmodel wel wat formeler aanpakken.

We gaan uit van een groot aantal deeltjes – zeg N in totaal – dat opgesloten zit in een rechthoekig volume V met breedte x , hoogte y , en diepte z , dus $V = xyz$ (figuur 3.3 a). We beschouwen de deeltjes als kleine knikkers die met elkaar en met de wanden kunnen botsen. We veronderstellen dat botsingen tussen deeltjes onderling, en van een deeltje met de wanden *volledig elastisch zijn*. Dat wil zeggen dat er geen kinetische energie verloren gaat. Om het rekenwerk te vereenvoudigen gaan we er ten slotte vanuit dat de



Figuur 3.3 a t/m f Opbouw van de kwantitatieve kinetische gastheorie

Extra

In $p = \frac{m \cdot v^2}{V}$ is het interessant te bekijken waar de twee factoren v vandaan kwamen. Eén factor v kwam van de botsing met de wand ($\Delta v = 2 \cdot v$): als het deeltje sneller beweegt, zal elke botsing heftiger zijn en meer druk uitoefenen. De andere factor v kwam van de tijd tussen twee botsingen $\left(\Delta t = \frac{2 \cdot x}{v} \right)$: als het deeltje sneller beweegt, zullen er meer botsingen tegen de wand voorkomen en de druk zal stijgen.

deeltjes zo klein zijn dat we ze als *puntvormig* kunnen beschouwen. Dat wil zeggen dat we het volume van de deeltjes zelf kunnen verwaarlozen.

Allereerst bekijken we slechts één deeltje dat horizontaal heen en weer beweegt. Zijn massa is m en zijn snelheid is v (figuur 3.3 b). Eenvoudig is in te zien dat een deeltje heen en weer beweegt in een tijd

$$\Delta t = \frac{\text{afstand}}{\text{snelheid}} = \frac{2x}{v}$$

De tijd tussen twee botsingen met de rechterwand is dus ook gelijk aan $\Delta t = 2x/v$.

Bij zo'n botsing verandert de snelheid van het deeltje telkens van $+v$ naar $-v$. Een totale snelheidsverandering van $\Delta v = 2v$ dus.

Maar wacht eens... snelheidsverandering? Dat betekent dat er een versnelling is! En waar versnelling is, is kracht: $F = ma$. Omdat $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ betekent dit dat een deeltje bij een botsing met de wand een kracht uitoefent van:

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \frac{2v}{2x/v} = \frac{mv^2}{x}$$

(Voor scherp-slijpers: die versnelling vindt alleen gedurende de botsing zelf plaats, eigenlijk is er een veel grotere versnelling gedurende een veel kleinere tijd. Hetzelfde geldt dan voor de kracht. We middelen dat uit over $2\Delta t$ want we zijn alleen geïnteresseerd in een gemiddelde kracht)

Deze kracht wordt gevoeld door het gehele oppervlak A van de rechterwand (figuur 3.3) en wordt dus gespreid over een wand met oppervlakte $A = y \cdot z$. De druk van het deeltje op de rechterwand wordt dus:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{mv^2/x}{yz} = \frac{mv^2}{xyz} = \frac{mv^2}{V} \quad (\text{figuur 3.3 c}).$$

We hebben nu een formule waar p en V in staan. Je ziet, de wet van Boyle krijgt langzaam maar zeker gestalte.

- We zien dat de druk inderdaad omgekeerd evenredig is met het volume zoals de wet van Boyle zegt.
- We zien bovendien dat de druk toeneemt met de massa en het kwadraat van de snelheid.

Dit laatste is een nieuwe en onverwachte conclusie. Het lijkt erop dat we daarmee de constante in de wet van Boyle hebben bepaald.

Maar we zijn er nog niet helemaal!

Tot nu toe hebben we slechts één deeltje in de x -richting bekeken. Laten we het aantal deeltjes toenemen tot N , dan zal de druk groter worden (figuur 3.3d). En laten we de deeltjes in willekeurige richtingen bewegen, dan zal *gemiddeld* $\frac{1}{3}$ van deze deeltjes in de x -richting bewegen (figuur 3.3 e). De druk wordt daardoor $\frac{1}{3}$ keer zo groot, en we krijgen als resultaat:

$$p = \frac{1}{3} N \frac{mv^2}{V}.$$

Tot slot laten we de deeltjes met *willekeurige* snelheden bewegen (figuur 3.3 f). Dit verandert uiterlijk weinig aan de vergelijking, alleen dat we nu de *gemiddelde* (kwadratische) snelheid gebruiken:

$$p = \frac{1}{3} N \frac{m \langle v^2 \rangle}{V}$$

De gasdeeltjes zijn in beweging. De energie van deze beweging wordt de kinetische energie genoemd:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$$

Door mv^2 te vervangen door $2 \cdot E_{kin}$ en het gemiddelde te nemen $\langle E_{kin} \rangle$:

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \langle E_{kin} \rangle$$

Door V naar de andere kant te brengen krijgen we:

Kinetische gastheorie

De kinetische gastheorie geeft weer hoe druk en volume van een gas afhangen van het aantal gasdeeltjes en de gemiddelde kinetische energie van die deeltjes.

$$p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \langle E_{kin} \rangle$$

Symbolen: p is de druk in Pascal (Pa), V is het volume in kubieke meters (m^3), N is het aantal deeltjes in dat volume en $\langle E_{kin} \rangle$ is de gemiddelde kinetische energie van die deeltjes in Joule (J).

Dat was stevig rekenwerk. Maar het resultaat mag er zijn! We hebben, door een gas te beschouwen als een verzameling door elkaar heen bewegende deeltjes, laten zien dat het product pV inderdaad constant is. Tenminste, als aan twee voorwaarden wordt voldaan:

- Het aantal gasdeeltjes in het volume blijft gelijk.
- De gemiddelde kinetische energie van de gasdeeltjes blijft gelijk.

Hiermee is ook direct in te zien waarom het van belang was dat Boyle er bij zijn proeven voor zorgde dat er geen gas in of uit het volume stroomde: het aantal gasdeeltjes zou dan toe- of afnemen en dat zou de druk beïnvloeden. Boyle deed echter meer dan dat. Hij hield ook de temperatuur constant. Zou dat iets met die kinetische energie te maken kunnen hebben?

Extra

Met het symbool $\langle \rangle$ geven we een gemiddelde aan. In het geval van de kinetische gastheorie het gemiddelde van het kwadraat van de snelheid $\langle v^2 \rangle$. Let op dat $\langle v^2 \rangle$ niet hetzelfde is als $\langle v \rangle^2$, het kwadraat van de gemiddelde snelheid!* We nemen eerst het kwadraat van de snelheden en *daarna* het gemiddelde, niet andersom.

Dit betekent ook dat we bij het uitrekenen van $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ niet de gemiddelde snelheid vinden, maar een grootte die in het Engels *root-mean-square velocity* heet: de wortel uit het gemiddelde van de kwadraten van de snelheden. In het Nederlands spreken we wel van de gemiddelde kwadratische snelheid maar het is handiger gewoon v_{rms} te schrijven.

*Een simpel voorbeeldje: het gemiddelde van 2 en 4 is 3. Gekwadrateerd levert dat 9 op. Het gemiddelde van 2² en 4² is juist 10. De volgorde 'kwadrateren – gemiddelde nemen', of 'gemiddelde nemen – kwadrateren' maakt dus wel degelijk uit!

Opgaven

Je kunt nu opgaven 7 en 8 maken.

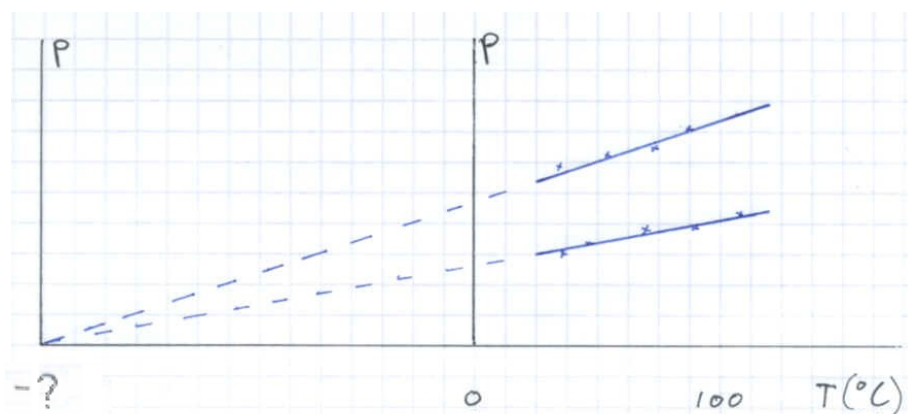
3.4



Figuur 3.4 Joseph Louis Gay-Lussac

Absolute temperatuur

Boyle was niet de enige die zich met het gedrag van gassen bezighield. De Franse wetenschapper Joseph Louis Gay-Lussac deed eveneens gassenonderzoek (figuur 3.4). In tegenstelling tot Boyle varieerde hij de temperatuur wel bij zijn proeven, hij hield alleen het volume constant. Zo onderzocht hij het verband tussen druk en temperatuur van een opgesloten gas, terwijl hij het volume constant hield. Daarbij bleken metingen van p versus T op een rechte lijn te liggen, dus $p = \text{constante} \cdot T$.



Figuur 3.5 (p,T) -diagram naar aanleiding van metingen van Gay-Lussac

In figuur 3.5 staat een grafiek van net zo'n experiment als Gay-Lussac deed. De twee lijnen zijn verkregen door twee verschillende hoeveelheden gas te bestuderen. Valt jou ook iets op? Inderdaad. Als we de lijnen door onze meetpunten doortrekken, zien we dat de druk altijd op 0 Pa uitkomt bij dezelfde temperatuur. Gay-Lussac bepaalde deze op $T = -267^\circ\text{C}$. Omdat een negatieve druk geen betekenis heeft, zit er blijkbaar een ondergrens aan temperatuur: -267°C is de *laagst mogelijke temperatuur*. In de jaren na Gay-Lussac is deze temperatuur bijgesteld tot $-273,15^\circ\text{C}$. Deze temperatuur wordt het **absolute nulpunt** genoemd.

Practicum - Gay-Lussac

Voer zelf het historische experiment van Gay-Lussac uit. Zie de handleiding in bijlage B.4.

De **absolute temperatuurschaal** begint bij het absolute nulpunt en heeft als eenheid Kelvin (afgekort: K). 0 K komt dus overeen met $-273,15^\circ\text{C}$. Om niet helemaal van de **Celsiusschaal** te vervreemden, is afgesproken dat een temperatuurstijging van 1 K overeenkomt met een stijging van 1°C .

We kunnen nu ook gemakkelijk Celsiustemperatuur (T_C) omrekenen naar absolute temperatuur (T_K):

Opgaven

Je kunt nu opgaven 9 en 10 maken.

Valkuil

Of het is gedaan om verwarring te zaaien weten we niet, maar de eenheid van de absolute temperatuurschaal spreek je uit als 'Kelvin'. En dus niet als 'graden Kelvin'! Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld 'graden Celsius'.

Absolute temperatuur

Met behulp van onderstaande vergelijking kunnen Celsius- en absolute temperatuur naar elkaar omgerekend worden.

$$T_K = T_C + 273,15 \quad \text{of} \quad T_C = T_K - 273,15$$

Symbolen: T_K is de (absolute) temperatuur in Kelvin (K), T_C is de (Celsius) temperatuur in graden Celsius $^{\circ}$.

Bij het omrekenen van Celsius naar Kelvin tellen we vaak 273 bij de Celsius-temperatuur op i.p.v. 273,15. Dit vereenvoudigt berekeningen.

3.5

De algemene gaswet

Behalve de drukwet is er ook een **volumewet van Gay-Lussac**. Deze is opgesteld naar aanleiding van proeven waarbij niet het verband tussen druk en temperatuur, maar juist tussen volume en temperatuur is onderzocht. In dit geval hield Gay-Lussac de gasdruk constant en vond hij:

$$\frac{V}{T} = \text{Constant}$$

Let op: de constanten in de drukwet en de volumewet van Gay-Lussac zijn niet gelijk.

Samen met de wet van Boyle staan de wetten van Gay-Lussac bekend als 'de gaswetten': drie bondige wetten die het gedrag van gassen onder verschillende omstandigheden beschrijven.

Vaak zijn deze aparte gaswetten erg handig, maar lang niet altijd. Wat te doen bijvoorbeeld wanneer zowel druk, volume als temperatuur variëren? Of als de hoeveelheid gas – het aantal gasdeeltjes – verandert? Met deze situaties houden de gaswetten geen rekening. Gelukkig zijn de gaswetten eenvoudig te combineren tot

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{Constant}$$

Het blijkt dat de hierin voorkomende constante recht evenredig is met het aantal deeltjes $\text{Constant} = Nk$ met k een constante die voor alle gassen dezelfde waarde heeft. Dit wordt de wet van Avogadro genoemd. Het uiteindelijke resultaat is de 'allesomvattende' **algemene gaswet** voor het eerst opgesteld door Clapeyron in 1834:

Algemene gaswet I

De algemene gaswet beschrijft het verband tussen de druk, het volume, de temperatuur en het aantal deeltjes van een afgesloten hoeveelheid gas.

$$pV = NkT$$

Symbolen: p is de druk in Pascal (Pa), V is het volume in kubieke meters (m^3); N is het aantal gasdeeltjes; T is de temperatuur in Kelvin (K); k is de constante van Boltzmann (met een waarde van $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$).

Geldigheid: De algemene gaswet geldt voor alle ideale gassen. Wat dat precies zijn, komen we later op terug in hoofdstuk 4.



Figuur 3.6
Ludwig Boltzmann

De algemene gaswet geeft een volledige beschrijving van het gedrag van gasen onder vrijwel alle omstandigheden. Elke verandering in een van de grootheden p , V , N of T heeft veranderingen van de andere grootheden tot gevolg. Alleen k is een constante, vernoemd naar de Oostenrijker Ludwig Boltzmann (figuur 3.6), die een belangrijke rol heeft gespeeld bij de ontwikkeling van de kwantitatieve kinetische gastheorie.

Omdat N meestal een enorm getal is (een liter gas bevat al snel zo'n 10^{22} deeltjes), wordt er vaak met een iets andere vorm van de algemene gaswet gewerkt. Hierbij wordt de hoeveelheid gas in 'mol' genomen – 1 mol gas bestaat uit $6,022 \cdot 10^{23}$ deeltjes. De algemene gaswet wordt dan:

Algemene gaswet II

De algemene gaswet beschrijft het verband tussen de druk, het volume, de temperatuur en het aantal mol deeltjes van een afgesloten hoeveelheid gas.

$$pV = nRT$$

Symbolen: p is de druk in Pascal (Pa), V is het volume in kubieke meters (m^3), n is de hoeveelheid gas in mol en R is de gasconstante met een waarde van $8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Geldigheid: De algemene gaswet geldt voor alle ideale gassen. Wat dat precies zijn, komen we later op terug in hoofdstuk 4

Valkuil

In elke formule waarin de temperatuur T voorkomt (bijvoorbeeld de algemene gaswet), moet je de absolute temperatuur in Kelvin invullen. Gebruik je de Celsius temperatuur, dan kom je uit op onzinnige antwoorden.

Een warm klaslokaal

Vraag:

In een klaslokaal met afmetingen 6,0 m bij 15,0 m bij 2,5 m heersen de standaard luchtdruk en een temperatuur van 15°C . Om het behaaglijk te maken verwarmt de docent het lokaal tot 21°C .

a) Bereken de nieuwe druk in het lokaal.

Vervolgens opent de docent een raam, totdat de druk in het lokaal weer is gezakt tot standaardniveau.

b) Bereken de hoeveelheid lucht (in mol) die door het raam is ontsnapt.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 11 - 19 maken.

Een warm klaslokaal (vervolg)

Antwoord:

a) n , V en R zijn constant, T en p veranderen. We stellen de constanten aan elkaar gelijk:

$$\frac{p_{\text{voor}}}{T_{\text{voor}}} = \frac{n \cdot R}{V} = \frac{p_{\text{na}}}{T_{\text{na}}}$$

$T_{\text{voor}} = 288 \text{ K}$, $T_{\text{na}} = 294 \text{ K}$ en $p_{\text{voor}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (BiNaS tabel 7):

$$\frac{1,01 \cdot 10^5}{288} = \frac{p_{\text{na}}}{294} \Rightarrow p_{\text{na}} = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 294}{288} = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

b) De ontsnapte hoeveelheid lucht is gelijk aan de hoeveelheid lucht in het lokaal voordat het raam geopend was, minus de hoeveelheid lucht in het lokaal nadat het raam geopend is. In symbooltaal: $n_{\text{ontsnapt}} = n_{\text{voor}} - n_{\text{na}}$

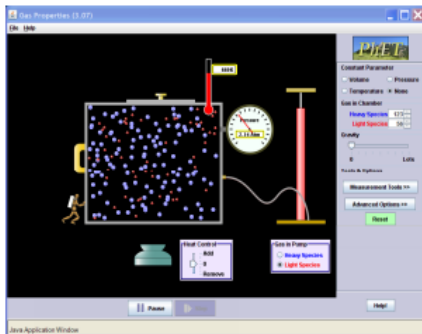
$$p_{\text{voor}} \cdot V_{\text{voor}} = n_{\text{voor}} \cdot R \cdot T_{\text{voor}}$$

$$n_{\text{voor}} = \frac{p_{\text{voor}} \cdot V_{\text{voor}}}{R \cdot T_{\text{voor}}} = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 225}{8,31 \cdot 288} = 9,5 \cdot 10^3 \text{ mol}$$

$$p_{\text{na}} \cdot V_{\text{na}} = n_{\text{na}} \cdot R \cdot T_{\text{na}}$$

$$n_{\text{na}} = \frac{p_{\text{na}} \cdot V_{\text{na}}}{R \cdot T_{\text{na}}} = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 225}{8,31 \cdot 294} = 9,3 \cdot 10^3 \text{ mol}$$

$n_{\text{begin}} - n_{\text{eind}} = 2 \cdot 10^2 \text{ mol}$. Er is dus ongeveer 200 mol lucht door het raam ontsnapt. (Dat is 8 liter, zeg maar 1 emmer lucht)



Figuur 3.7 De algemene gaswet controleren met behulp van applets.

Internet

Bekijk de applets op [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen](#) en [PhET Interactive Simulations; Gas Properties](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.2.

3.6

Temperatuur als maat voor beweging

Met de algemene gaswet is een groot aantal rekenproblemen met gassen op te lossen, wat natuurlijk erg prettig is. Toch is dat niet de belangrijkste conclusie die we in dit hoofdstuk willen trekken. Door het werken met een deeltjesmodel voor gassen kunnen we namelijk veel fundamentele dingen aantonen.

Zo hebben we al gezien dat de *macroscopische*, meetbare eigenschap gasdruk te relateren is aan *microscopische*, onmeetbare botsingen van gasdeeltjes tegen de wanden van een gasfles. Dit noemen we een micro-macro verband.

Er is echter een tweede micro-macro verband, dat nog veel belangrijker is dan dat tussen botsingen en gasdruk. Om te zien waar we het over hebben, vergelijken we de algemene gaswet met de kinetische gastheorie:

- Algemene gaswet: $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$
- Kinetische gastheorie: $p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \langle E_{kin} \rangle$

We zien dus dat

$$NkT = pV = \frac{2}{3} N \langle E_{kin} \rangle$$

Na het wegstrepen van N , houden we over:

$$kT = \frac{2}{3} \langle E_{kin} \rangle$$

Valkuil

We zijn geneigd om temperatuur en deeltjesbeweging als losse grootheden te beschouwen, waardoor we vaak oorzaak-gevolg relaties gebruiken. Denk bijvoorbeeld aan een uitspraak als “wanneer de temperatuur stijgt, gaan de deeltjes sneller bewegen”. Het is echter niet zo dat het één eerst gebeurt, en vervolgens het ander: temperatuur *zijn* equivalent.

Wat we in paragraaf 3.3 al vermoedden, is waar: temperatuur en (gemiddelde) kinetische energie van de deeltjes hebben direct met elkaar te maken. Sterker nog, **temperatuur** is niets anders dan de *macroscopische* maat voor de *microscopische* beweging van de deeltjes. Temperatuur is een maat voor beweging van deeltjes; hoe heftiger de deeltjes gemiddeld bewegen, hoe hoger de temperatuur. Andersom geldt ook, hoe hoger de temperatuur, hoe heftiger de deeltjes bewegen.

Na omschrijven van de bovenstaande formule krijgen we:

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

We zien dat de constante $\frac{3}{2} \cdot k$ onafhankelijk is van de massa van de gasmoleculen. Bij dezelfde temperatuur hebben verschillende gassen dus dezelfde gemiddelde kinetische energie.

Dit resultaat geeft ook een aardige interpretatie voor de constante van Boltzmann: k heeft de juiste eenheden (JK^{-1}) om dienst te doen als een factor voor het omrekenen van een temperatuur naar gemiddelde moleculaire kinetische energie. In het volgende rekenvoorbeeld zul je zien hoe groot deze energie van een gasdeeltje is.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 20 – 25 maken.

De koppeling tussen temperatuur en deeltjesbeweging geldt niet alleen voor gassen, maar voor alle fasen. Hiermee krijgt ook het absolute nulpunt een nieuwe gestalte: *het absolute nulpunt is de temperatuur die overeenkomt met de minimale deeltjesbeweging*. Minder dan minimaal is natuurlijk onmogelijk en daarom is er geen lagere temperatuur dan het absolute nulpunt.

Extra

Je zou misschien denken dat de minimale beweging van deeltjes stilstaan is. Een beroemde natuurwet (de 'Onzekerheidsrelatie van Heisenberg') verbiedt het echter dat deeltjes stilstaan. Volgens dit principe kun je namelijk nooit tegelijk de snelheid en de plaats van een deeltje weten. Als een deeltje stil zou staan, zou het echter betekenen dat we wél de plaats en de snelheid weten (namelijk 0 m/s). En dat kan nu net niet! Zelfs bij 0 K zullen de deeltjes dus nog een beetje bewegen.

Molecuulsnelheid

Vraag:

Wat is een typische snelheid voor stikstofmoleculen bij een temperatuur van 300 K (27 °C)?

Antwoord:

We gebruiken $\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ en $\langle E_{kin} \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$

De massa van 1 mol stikstof is 28 g, dus één stikstofmolecuul heeft een

massa van $m_{N_2} = \frac{28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ deeltjes/mol}} = 4,65 \cdot 10^{-26} \text{ kg/deeltje}$.

$$\frac{3}{2} \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = \frac{1}{2} \cdot 4,65 \cdot 10^{-26} \cdot \langle v^2 \rangle$$

$$\Rightarrow \langle v^2 \rangle = 2,7 \cdot 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

De 'root mean square' snelheid van een stikstofmolecuul bij $T = 300 \text{ K}$ is dan

$v_{rms} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{2,7 \cdot 10^5} = 517 \text{ ms}^{-1}$. Een behoorlijke snelheid!

Een lichter deeltje zoals een waterstof (H_2) molecuul heeft een typische snelheid $v_{rms} = 1950 \text{ m/s}$.

3.7

De wet van Avogadro

In 1811 stelde de Italiaan Amedeo Avogadro dat: gelijke volumes van ideale gassen bevatten bij dezelfde temperatuur en druk hetzelfde aantal moleculen. Dit is bekend geworden als de **wet van Avogadro**. Het aantal moleculen in een dergelijk gas is dus onafhankelijk van de grootte of massa van de moleculen. Dit is nogal wat. We kunnen deze conclusie ook trekken aan de hand van de ideale gaswet. Bij standaarddruk en kamertemperatuur heeft 1 mol gas het volume van:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 298}{1,03 \cdot 10^5} = 0,0244 \text{ m}^3 = 24,4 \text{ liter}$$

Welk gas je ook neemt, bij deze omstandigheden zal dat gas het bovenstaande (molair) volume innemen.

3.8

Zwaartekracht en de atmosfeer

Het 'vat' met gas waar we in het dagelijkse leven het meest mee te maken hebben is de atmosfeer van de aarde. Het gas in de atmosfeer is natuurlijk lucht, dat eigenlijk een mengsel van verschillende gassen is. De atmosfeer is heel anders dan een 'gewoon' vat met gas, door de nadrukkelijke invloed van de zwaartekracht op de luchtmoleculen.

Waar bij een opgesloten gas de druk op alle wanden gelijk is, hangt de druk van de lucht sterk af van de hoogte waarop je die druk meet. Op zeeniveau is de **luchtdruk** ongeveer 10^5 Pa , maar op zes kilometer hoogte is deze al gehalveerd.

Ook bij vloeistoffen hangt de druk af van de hoogte: $p_{\text{vloeistof}} = \rho \cdot g \cdot h$, waarbij p de druk is, ρ de dichtheid van de vloeistof, g de valversnelling en h de hoogte. Bij de lucht in de atmosfeer is er echter nog meer aan de hand, wat ook wel blijkt uit het volgende voorbeeld:

Hoogte van de atmosfeer

Vraag:

Bereken de hoogte van de atmosfeer, uitgaande van de vergelijking

$$p = \rho \cdot g \cdot h. \text{ Neem } p = p_0 \text{ en } \rho = \rho_{\text{lucht}} \text{ (bij 273 K).}$$

Wat is de werkelijke hoogte?

Antwoord:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \rho_{\text{lucht}} = 1,293 \text{ kgm}^{-3} \text{ en } g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$$

$$h = \frac{p_0}{\rho_{\text{lucht}} \cdot g} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,293 \cdot 9,81} = 8334 \text{ m.}$$

De werkelijke hoogte van de atmosfeer is moeilijk te bepalen. In BiNaS worden waarden tot wel $4,0 \cdot 10^7 \text{ m}$ vermeld.

Opgaven

Je kunt nu opgave 26 – 28 maken.

Het probleem zit hem in het feit dat de vergelijking $p = \rho \cdot g \cdot h$ er vanuit gaat dat de dichtheid ρ constant is. En dat is in de atmosfeer bij lange na niet het geval!

De algemene gaswet is ook te schrijven als:

$$p = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M},$$

waarbij M de massa van 1 mol deeltjes is. Doordat p afneemt met de hoogte, zal ρ dat volgens de algemene gaswet ook doen. En hierdoor neemt p nog eens extra af! In plaats van een lineaire afname met de hoogte, verloopt de drukafname in de atmosfeer bij benadering exponentieel.

Bij benadering, want temperatuurwisselingen en stromingsverschijnselen maken van de atmosfeer een nóg complexer systeem.

Practicum – Hoogtemeter

Bekijk het verloop van de luchtdruk met behulp van een zelfgemaakte hoogtemeter. Zie de beschrijving in bijlage B.4.

3.9

De deeltjes in de atmosfeer

Als de dichtheid van de lucht in de atmosfeer afneemt met de hoogte, betekent dat dus dat er op grotere hoogte minder luchtmoleculen per m^3 zijn dan op zeeniveau. In de vorige paragraaf hebben we dit macroscopisch bekeken, maar ook microscopisch is een goede verklaring te geven.

Opgaven

Je kunt nu opgave 29 maken.

Hoe hoger in de atmosfeer een luchtmolecuul zit, hoe meer zwaarte-energie het heeft. Deze energie komt natuurlijk ergens vandaan: uit de kinetische energie van het molecuul. Alleen de moleculen die op zeeniveau veel kinetische energie hebben, maken een kans hoog in de atmosfeer te komen. Deze moleculen zijn schaars, dus de dichtheid hoog in de atmosfeer is ook gering.

3.10

Terugblik

We hebben aangenomen dat een gas bestaat uit deeltjes (kleine knikkers die botsen). Met dit simpele microscopische ‘model’ van een gas konden we de macroscopische algemene gaswet afleiden. Dit blijkt typisch te zijn voor natuurkunde: een vereenvoudigd model gebruiken om ingewikkelde natuur te begrijpen en juist een deeltjes model te gebruiken. Met hetzelfde deeltjes model kunnen we nog veel meer gas eigenschappen verklaren waarbij transport van gassen een rol speelt, zoals in milieu problemen.



Figuur 3.8 Wat gebeurt hier?

Internet

Magie?

[Joost van der Schee; Opwaartse kracht](#)

Bekijk de applet op

[NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen](#)

en maak de opdrachten uit bijlage A.3.

Begrippen

Druk
Wet van Boyle
Kinetische gastheorie
Kwadratische gemiddelde snelheid
Drukwet van Gay-Lussac
Absolute nulpunt
Absolute temperatuurschaal
Celsiuschaal
Volumewet van Gay-Lussac
Algemene gaswet
Mol
Micro-macro verband
Temperatuur
Wet van Avogadro
Luchtdruk

Samenvatting

Je kunt:

- het gedrag van gassen in een afgesloten ruimte beschrijven;
- uitleggen wat met het begrip druk bedoeld wordt;
- uitleggen wat het kinetisch gasmodel inhoudt;
- met het kinetisch gasmodel de wet van Boyle en de wetten van Gay-Lussac uitleggen;
- berekeningen uitvoeren met de algemene gaswet en de uitkomsten van deze berekeningen met het kinetisch gasmodel verklaren;
- uitleggen wat er met het absolute nulpunt bedoeld wordt;
- het verschil tussen de Celsius temperatuurschaal en de absolute temperatuurschaal uitleggen en deze gebruiken in berekeningen;
- de *root mean square* snelheid van een gasmolecuul berekenen;
- een microscopische beschrijving van de temperatuur geven;
- uitleggen wat de wet van Avogadro inhoudt;
- het effect van de zwaartekracht op de drukverdeling in een gas (met name in de atmosfeer) uitleggen;

- de afleiding die leidt tot $pV = \frac{3}{2} N < E_{kin} >$ in grote lijnen volgen en begrijpen dat hier een micro-macro verband gelegd wordt. Je hoeft deze afleiding niet uit het hoofd te kennen.

Opgaven

§3.1

5 Grafiek

Maak een schets van een (p,V)-grafiek volgens de wet van Boyle.

6 Weerballon

Een helium ballon met weerkundige meetapparatuur heeft op grondniveau een volume van 2,0 m³. De ballon moet de meetapparatuur vervoeren tot een hoogte waarop de druk 25 % is van de druk op grondniveau. Bereken de volumetoename waar de ontwerper rekening mee moet houden, gebaseerd op deze gegevens.

§3.3

7 Kinetische energie

Een mol waterstofgas (H₂) heeft een volume van 0,024 m³ bij een druk van 10⁵ Pa. Laat zien dat de gemiddelde kinetische energie van een waterstofmolecuul in de orde van 10⁻²⁰ J ligt.

8 Lucht

Een typisch luchtmolecuul heeft een snelheid in de grootte orde van 500 m s⁻¹.

- Bereken de tijd die zo'n molecuul nodig heeft om een klaslokaal van 10 m te doorkruisen.
- Geef een reden waarom het in feite veel langer duurt dan de bij a) berekende tijd.

§3.4

9 Vingeroefening

(Neem $T_K = T_C + 273$)

- Geef het kookpunt van water in Kelvin.
- Geef het smeltpunt van koper in graden Celsius.
- Ga na in BINAS of het klopt dat stikstofgas vloeibaar wordt bij -96 °C.

10 Fahrenheit

Naast de Kelvinschaal en de Celsiusschaal kennen we ook de Fahrenheit-schaal, die in de Verenigde Staten de gangbare temperatuurschaal is. Hoe Fahrenheit precies aan zijn schaalverdeling kwam, is onduidelijk. Wat we wel weten is dat het smeltpunt van water bij 32 °F ligt, en het kookpunt van water bij 212 °F.

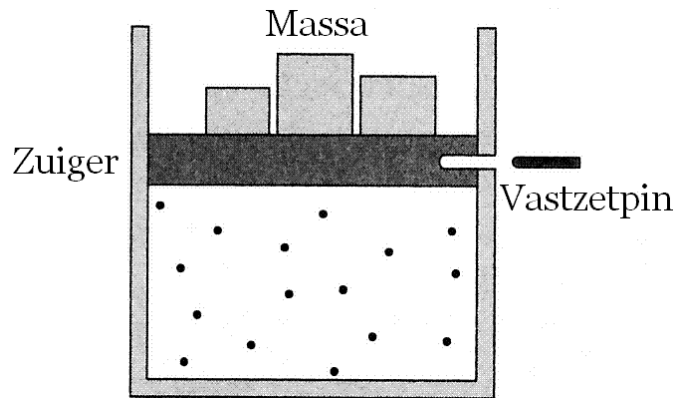
- a. Laat zien dat je een temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ (T_C) om kunt rekenen naar een temperatuur in $^{\circ}\text{F}$ (T_F) via:

$$T_F = \frac{9}{5} \cdot T_C + 32$$

- b. Reken je lichaamstemperatuur (37°C) om naar $^{\circ}\text{F}$.
 c. Stel zelf een formule op waarmee je een temperatuur in $^{\circ}\text{F}$ kunt omrekenen naar een temperatuur in K (dus $T_K = \dots$).
 d. Bereken de temperatuur waarbij het aantal graden Fahrenheit gelijk is aan het aantal graden Celsius.
 e. Ga na of er ook een temperatuur in Kelvin is die gelijk is aan een temperatuur in Fahrenheit.

§3.5

11 Algemene gaswet (met antwoord op p. 52)



Figuur 3.9 Een gascilinder

In de cilinder van figuur 3.9 is een ideaal gas opgesloten. De cilinder is afgesloten door een zuiger die wrijvingsloos op en neer kan bewegen. De druk kan gevarieerd worden door gewichten op de zuiger te zetten, of te verwijderen. De zuiger kan vastgezet worden met een pin. Zo kan het volume constant worden gehouden. Tenslotte heb je de mogelijkheid om de gehele gascilinder in een bak met heet of koud water te stoppen. Zo kan de temperatuur gevarieerd worden.

- a. Kun je V kleiner maken zonder p te veranderen? Hoe?
 b. Kun je V kleiner maken zonder T te veranderen? Hoe?
 c. Kun je p kleiner maken zonder T te veranderen? Hoe?
 d. Kun je p kleiner maken zonder V te veranderen? Hoe?

12 Grafieken

Schets:

- a. Een (p, T) -grafiek die hoort bij de drukwet van Gay-Lussac
 b. Een (V, T) -grafiek die hoort bij de volumewet van Gay-Lussac

13 Band oppompen

In een band met een volume van 8,2 liter zit 15 gram lucht bij een temperatuur van 15 °C. 1 mol lucht weegt 29 gram.

- Bereken de druk in de band.
- Men pompt extra lucht in de band. Hierdoor stijgt de temperatuur in de band tot 35 °C, het volume tot 9,5 liter en de druk tot 2,3 bar. Bereken hoeveel gram extra lucht er in de band is gepompt.

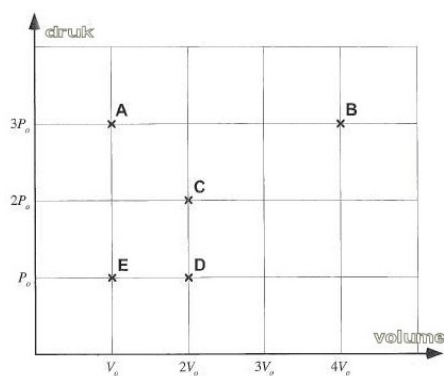
14 Diepvrieskast

In een diepvrieskast heerst een temperatuur van -18 °C. De kast is afgesloten met een deur met een magnetische sluiting. Op het handvat van de deur moet 22 N worden uitgeoefend om de magnetische sluiting te verbreken. De deuropening meet 60 cm x 35 cm. Iemand opent de deur om iets uit de vrieskast te halen. De temperatuur van de lucht in de kast stijgt hierdoor met 35 °C. Wanneer men vervolgens de kastdeur sluit daalt de temperatuur in de kast weer. De druk in de ruimte waarin de vrieskast staat is 1,00 bar.

- Leg uit waarom de deur even later vrij moeilijk is te openen.
- Leg uit waarom het wenselijk is dat de kast niet helemaal luchtdicht is afgesloten.
- Bereken de kracht die men op het handvat van de deur zou moeten uitoefenen om hem te openen als de temperatuur in de kast na het sluiten van de deur weer is gedaald tot -18 °C en er helemaal geen lucht lekkage zou optreden. Ga er daarbij vanuit dat het handvat van de deur op de verticale rand van de deur is aangebracht.

15 Nog eens weerballon

Opgave 6 vereenvoudigt de situatie teveel. De ballon moet komen op een hoogte waarop de druk nog 25 % is van de druk op grondniveau, maar waarop de temperatuur gedaald is tot -30°C. Op grondniveau is de temperatuur 20°C. Met welke volumetoename moet de ontwerper rekening houden gebaseerd op deze gegevens?



Figuur 3.10 Rangschikken I

16 Moleculen in een luciferdoosje

Een mol van ieder gas heeft een volume van 24,4 liter onder normale omstandigheden (kamertemperatuur). Laat zien dat een luciferdoosje ongeveer 10^{20} lichtmoleculen bevat.

17 Rangschikken I

In welke van de situaties A t/m E uit figuur 3.10 heerst de hoogste temperatuur? In het (p,V) -diagram is telkens 1 mol van een ideaal gas weergegeven. Rangschik de temperaturen van hoog naar laag

Hoogste temperatuur laagste temperatuur.

Als in twee situaties dezelfde temperatuur heerst omcirkel dan de letters.

Licht je keuze met een duidelijke redenering toe.

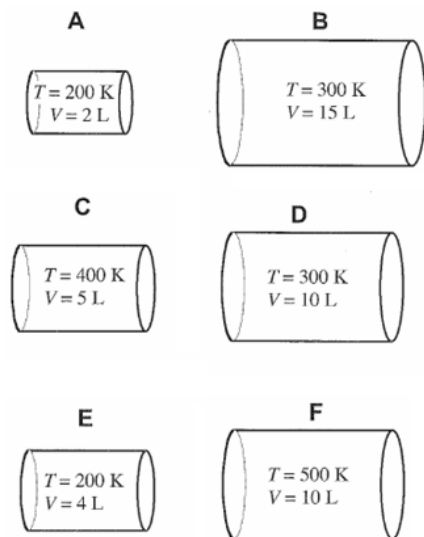
18 Rangschikken II

Eenzelfde hoeveelheid heliumgas bevindt zich in verschillende cilinders A t/m F (figuur 3.11). Rangschik de druk in de cilinders van de hoog naar laag.

Hoogste druk laagste druk.

Als in twee situaties dezelfde druk heerst omcirkel dan de letters.

Licht je keuze met een duidelijke redenering toe.



Figuur 3.11 Rangschikken II

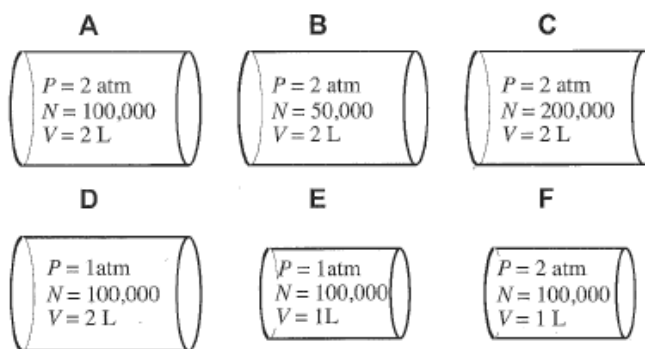
19 Rangschikken III

Een afgesloten hoeveelheid gas zit in de cilinders A t/m F (figuur 3.12). Aantal deeltjes, volume en druk zijn gegeven. Rangschik de cilinders van de hoogste naar de laagste temperatuur.

Hoogste temperatuur laagste temperatuur.

Als in twee situaties dezelfde temperatuur heerst omcirkel dan de letters.

Licht je keuze met een duidelijke redenering toe.



Figuur 3.12 Rangschikken III

§3.6

20 Algemene gaswet en kinetische energie (antwoord op p. 52)

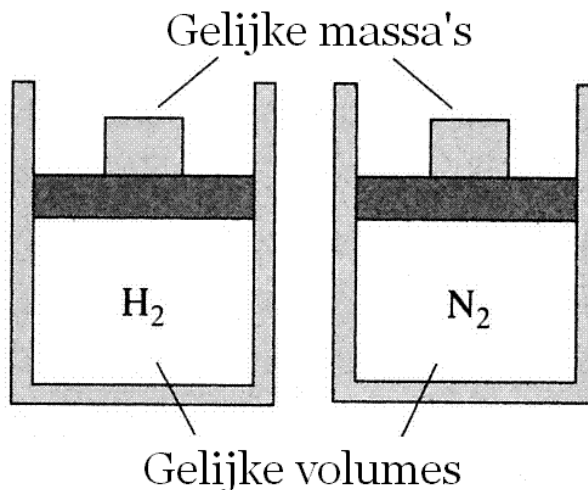
Twee vaten bevatten beide een ideaal gas bij dezelfde temperatuur en druk. Beide vaten bevatten dezelfde soort gas, maar vat B heeft een tweemaal zo groot volume als vat A. De gemiddelde kinetische energie per gasmolecuul in vat B is...

- A tweemaal zo groot als in vat A
- B gelijk aan die in vat A
- C de helft van die in vat A
- D onmogelijk te bepalen met deze gegevens

Stel nu dat het gas in A H_2 is en in B O_2 , verandert jouw antwoord dan?

21 Vergelijken van gassen (antwoord op p. 52)

Hieronder zijn twee identieke gascilinders weergegeven met twee ideale gassen. De volumes die de gassen innemen zijn dus gelijk. De ene cilinder bevat waterstof (H_2) de andere is gevuld met stikstof (N_2). De cilinders zijn afgesloten door een zuiger die wrijvingsloos op en neer kan bewegen. Er rust een gelijke massa op de beide zuigers. De druk op beide gassen is dus gelijk



Figuur 3.13 twee gascilinders

- Gegeven is dat beide gassen dezelfde massa hebben. Vergelijk nu de temperatuur van de beide gassen.
- Gegeven is dat de beide gassen dezelfde temperatuur hebben. Vergelijk het aantal mol gas in de cilinders.

22 Temperatuur van vacuüm

Leg uit waarom het onzinnig is om te spreken over de temperatuur van een vacuüm.

23 Naar het absolute nulpunt

Vloeibaar helium heeft een temperatuur van minder dan 4 K. Hoe zou je zo'n lage temperatuur kunnen meten, denk je? Discussieer met je klasgenoten.

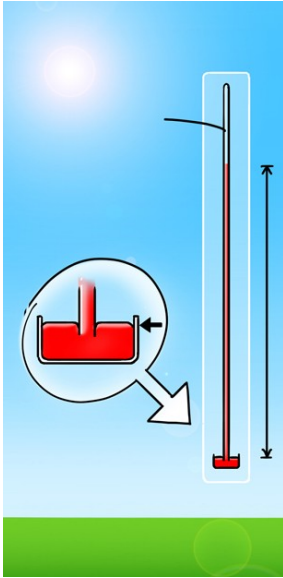
24 Bij het absolute nulpunt

Wat voorspelt de algemene gaswet over het volume van een bepaalde hoeveelheid gas bij het absolute nulpunt? Waarom is deze voorspelling onjuist?

25 Ontsnappingsnelheid

Bereken de gemiddelde kinetische energie en $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ van H_2 moleculen (massa ongeveer $3,10 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) onder aardse omstandigheden ($T = 300 \text{ K}$).

Om uit het gravitatieveld van de aarde te ontsnappen is een snelheid van $11 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$ nodig. Zullen de waterstofmoleculen ontsnappen?



Figuur 3.14 Barometer

26 Barometer

Met een barometer kun je de luchtdruk meten. Een kwikbarometer (zie figuur 3.14) bestaat uit een buis die gevuld is met kwik. Onderin eindigt de buis in een bakje met kwik, dat in contact staat met de lucht.

- Leg uit hoe je met deze opstelling de luchtdruk kunt meten.
- Hoe hoog staat het kwik als de luchtdruk gelijk is aan de standaardluchtdruk?

27 Dezelfde vergelijkingen?

Laat zien dat $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ en $p = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M}$ dezelfde vergelijkingen zijn, waarbij M de massa van 1 mol deeltjes is.

28 Duiken

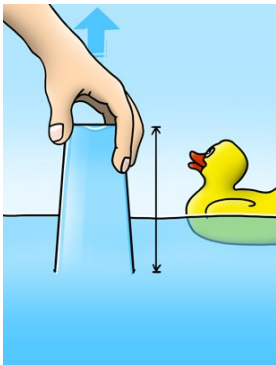
- Toon met een berekening aan dat de druk onder water toeneemt met 1 bar per 10 m.

Een luchtbelletje met een diameter van 1,0 mm stijgt op vanaf 40 m diepte.

- Bereken zijn diameter vlak onder het wateroppervlak.

Een duiker die van 20 m diepte naar boven komt, ondervindt dus aan het wateroppervlak een drie keer zo kleine druk. In zijn bloed is lucht opgelost. Deze lucht krijgt bij het stijgen een drie keer zo groot volume, waardoor de bloedsomloop risico loopt.

- Leg uit waarom snel stijgen van 50 m naar 40 m minder gevaarlijk is dan van 10 m naar 0 m.



Figuur 3.15 Glas ondersteboven

§3.8

29 Luchtdruk: denk- en rekenwerk

(Ga bij de rekenopgaven uit van de standaard luchtdruk p_0)

Als je drinkt met een rietje, zuig je niet direct de vloeistof op. Je zuigt echter de lucht weg, waardoor je een vacuüm in het rietje creëert.

- Leg uit hoe de vloeistof daardoor alsnog door het rietje gaat stromen. En waarom kun je op de maan niet met een rietje drinken?



Figuur 3.16 Zuignap

Het oppompen van water gebeurde vroeger op een manier die is te vergelijken met het drinken door een rietje.

- b. Wat was de maximale diepte vanwaar water kon worden opgepompt?
- c. Als je een glas ondersteboven uit het water haalt, blijft er water in het glas zolang het glas niet volledig uit het water is (zie figuur 3.15). Verklaar dit.
- d. Je kunt een zuignap behoorlijk stevig aan een muur bevestigen. Hoe gaat dit eigenlijk in zijn werk (figuur 3.16)?
- e. Waardoor kost het vaak moeite om een pot jam of appelmoes te openen?
- f. De luchtdruk oefent een flinke kracht uit op de rug van je hand. Bereken die kracht als de rug van je hand een oppervlakte van 150 cm^2 heeft.
- g. Waardoor kun je je hand toch zonder problemen horizontaal in de lucht houden?

Rekenen met de algemene gaswet

- Bepaal welke grootheden veranderen en welke constant zijn
- Stel nu voor de twee situaties (voor en na de verandering) de algemene gaswet op. Zorg dat alle constanten rechts staan en de variabelen links.
- Bijvoorbeeld voor een constante hoeveelheid deeltjes ($n_{\text{voor}} = n_{\text{na}}$) en een constante temperatuur ($T_{\text{voor}} = T_{\text{na}}$):

$$P_{\text{voor}} \cdot V_{\text{voor}} = n \cdot R \cdot T \quad P_{\text{na}} \cdot V_{\text{na}} = n \cdot R \cdot T$$

- Stel nu de constanten aan elkaar gelijk:

$$P_{\text{voor}} \cdot V_{\text{voor}} = P_{\text{na}} \cdot V_{\text{na}}$$

- Vul de gegevens uit de opgave in en je bent klaar!

4 Fasen en hun overgangen

Hoofdstukvraag	Hoe kunnen we faseovergangen met een deeltjesmodel beschrijven?
----------------	---

Naast gassen kennen we natuurlijk ook vaste stoffen en vloeistoffen. Hoe zijn deze fasen te modelleren?

4.1

Ideale en reële gassen

Uit het vorige hoofdstuk heb je misschien de indruk gekregen dat alle gassen precies hetzelfde gedrag vertonen. Is dat niet raar? We weten immers dat zuurstof met zijn O_2 -moleculen heel anders is dan bijvoorbeeld methaan (CH_4 -moleculen). Of kwikdamp, dat bestaat uit losse kwikatomen. Toch gedragen ze zich allemaal volgens de algemene gaswet. Echt waar?

Zoals wel vaker ligt de waarheid iets genuanceerder dan dat. De algemene gaswet beschrijft namelijk in principe alleen het gedrag van gassen die uit oneindig kleine, puntvormige deeltjes bestaan. Zo'n gas noemen we ook wel een **ideaal gas**, maar bestaat natuurlijk niet. Toch is de algemene gaswet ook in de praktijk, waar we met **reële gassen** te maken hebben, erg goed bruikbaar. Je hebt er zelf al het nodige rekenwerk mee verricht!

De reden hiervoor is dat vrijwel alle gassen onder 'normale' omstandigheden bij benadering ideaal zijn. De deeltjes zelf zijn namelijk veel kleiner dan de gemiddelde afstand tussen de deeltjes. Relatief gezien zijn de deeltjes dan inderdaad puntvormig. Pas in extreme situaties – bijvoorbeeld veel gas in een klein volume (een grote dichtheid dus) – zul je zien dat gassen zich niet meer volgens de algemene gaswet gedragen en komen ook verschillen tussen gassen naar voren.

4.2

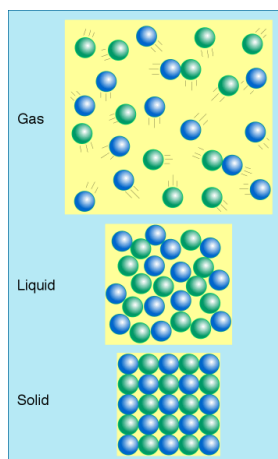
Van der Waalskrachten

De grenzen van het deeltjesmodel voor gassen komen in zicht. In de vorige paragraaf zag je al dat de aanname van puntvormige deeltjes niet in alle situaties gerechtvaardigd is. In deze paragraaf zul je zien dat ook een andere aanname zo zijn beperkingen heeft. We hebben het dan over de interactie tussen de deeltjes, die in het model alleen bestaat uit volledig elastische botsingen.

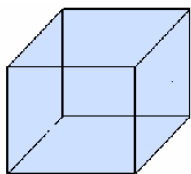
Want wat als we op zoek gaan naar faseovergangen? Uit het 'echte leven' weet je natuurlijk dat gassen bij verlaging van de temperatuur op een gegeven moment overgaan in vloeistoffen en vaste stoffen. Houdt het model hier rekening mee? Nee! Een lagere temperatuur betekent weliswaar dat de deeltjes langzamer bewegen, maar ze blijven vrolijk door elkaar heen vliegen: volgens het model blijft een gas een gas.

Opgaven

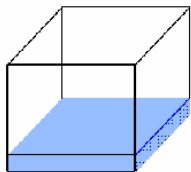
Je kunt nu opgave 30 maken.



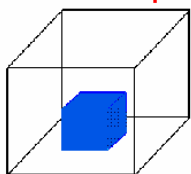
Figuur 4.1 De verschillende fasen vanuit microscopisch oogpunt



Gas



Liquid



Solid

Figuur 4.2 De verschillende fasen vanuit macroscopisch oogpunt

Waar gaat het mis? We hebben de voorzet eigenlijk al gegeven: het gaat mis doordat het model alleen maar rekening houdt met botsingen tussen de deeltjes. Waar het model geen rekening mee houdt, zijn de aantrekkende krachten die de deeltjes in werkelijkheid op elkaar uitoefenen. We noemen deze krachten ook wel **Van der Waalskrachten**.

Extra

Johannes van der Waals was een van de eersten die een kwantitatieve beschrijving van gassen opstelde, die wel rekening hield met deeltjesgrootte en onderlinge aantrekkingskrachten:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

a en b zijn twee constanten, met een verschillende waarde voor verschillende gassen. In de ideale gaswet is de V het volume waarin de deeltjes kunnen bewegen. We moeten V corrigeren voor het eigen volume van de deeltjes, dat is Nb , het volume (b) per mol deeltjes maal het aantal mol (n).

p is de gemeten druk maar die is kleiner vanwege de aantrekkingskracht tussen moleculen en die aantrekkingskracht heeft iets te maken met het aantal deeltjes en de dichtheid. We tellen er

dus iets bij op waar n en V in zitten: $\frac{n^2 a}{V^2}$ met een constante a die afhankelijk is van het soort gas.

In de gasfase bewegen de deeltjes snel genoeg om nauwelijks iets van de Van der Waalskrachten te merken. Vandaar dat we ze in het deeltjesmodel voor gassen konden negeren. Bij lagere temperaturen, als deeltjes langzamer bewegen, speelt de aantrekking echter nadrukkelijk een rol.

4.3

Vaste stoffen

In vaste stoffen bewegen de deeltjes zo traag, dat ze niet onder de onderlinge aantrekking uit kunnen komen. De Van der Waalskrachten zorgen ervoor dat elk deeltje op een vaste plek in blijft zitten. Of beter: rond een vaste plek. De deeltjes staan namelijk niet stil – dat gebeurt immers nooit! – maar maken een trillende beweging rond een vast punt.

Valkuil

Omdat er aan vaste stoffen weinig 'beweeglijkheid' te zien is – ze stromen niet zoals een vloeistof of een gas – denken veel mensen dat de deeltjes in vaste stoffen dan ook wel niet zullen bewegen. Jij weet nu wel beter!

Opgaven

Je kunt nu opgave 31 maken.

Extra

Om een gas of vloeistof over te laten gaan in een vaste stof verlagen we de temperatuur. Het kan ook helpen om de druk te verhogen. De deeltjes worden dan als het ware op hun vaste plaats gedrukt. Helium is zelfs niet tot vaste stof te maken zonder de druk flink op te voeren!

4.4 Vloeistoffen

Tussen de vaste fase en de gasvormige fase in zit de vloeistoffase. Van der Waalskrachten en deeltjessnelheid zijn in vloeistoffen min of meer in evenwicht. Het lukt de deeltjes om van hun vaste plek af te komen, maar hun snelheid is nog te klein om de onderlinge aantrekking volledig te overwinnen. De deeltjes van een vloeistof bewegen daardoor langs elkaar heen, zonder echt van elkaar los te komen.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 32 en 33 maken.

Internet



Bekijk de applet op [NiNa lesmateriaal: Stoffen en materialen](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.4.

4.5 Verdamping

We zijn gewend om te zeggen dat bijvoorbeeld water verdampt bij 100 °C, het kookpunt. We gaan dan echter voorbij aan het feit dat vloeistoffen – en zelfs vaste stoffen! – eigenlijk bij elke temperatuur verdampen. Kijk maar eens naar de natte was aan de waslijn. Na een paar uur is deze kurkdroog: het water is verdampt. De omgevingstemperatuur is echter geen 100 °C geweest!

Met een deeltjesmodel is te begrijpen hoe verdamping in zijn werk gaat. Zoals je weet bewegen de deeltjes van een vloeistof redelijk vrij door elkaar heen. Daarbij botsen ze ook tegen elkaar en bij zo'n botsing kan de snelheid van de deeltjes veranderen: het ene deeltje wint aan snelheid, ten koste van het andere. Soms wordt de snelheid van een deeltje daarbij hoog genoeg om de Van der Waalskracht te overwinnen: het deeltje ontsnapt uit de vloeistof en gaat over in de gasfase.

Merk op dat verdampen betekent dat snelle deeltjes ontsnappen. De vloeistof blijft dan achter met langzame deeltjes. Je weet dat deeltjessnelheid en temperatuur met elkaar samenhangen, en de vloeistof krijgt door verdamping dus een lagere temperatuur. Verdamping zorgt voor afkoeling! Dat gebeurt wanneer we zweten en je kent het koelingseffect van het dragen van natte kleding.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 31 en 32 maken.

Luchtstroom

Waarneming

Raam is koud en er vormt zich condens



Natte handdoek wordt verwarmd.



Verklaring m.b.v. deeltjesmodel

Dicht bij het raam bewegen de watermoleculen **minder snel** en klusteren door hun onderlinge aantrekkingskracht samen.



Watermoleculen mengen met de luchtmoleculen, en worden meegevoerd omhoog.



Watermoleculen bewegen **sneller** en ontsnappen uit de vloeistoffase.

4.6

Verzadigde dampdruk

Boven een vloeistof zal door de verdamping altijd een laagje gas aanwezig zijn. Wanneer er van een stof zowel vloeistof als gas aanwezig zijn, dan spreken in dit geval meestal van **damp** i.p.v. gas. Net als ieder gas oefent deze damp een druk uit: de **dampdruk**.

Naast het ontsnappen van de snellere moleculen uit de vloeistof, zullen er ook moleculen uit de damp weer 'ingevangen' kunnen worden in de vloeistof. Op een gegeven moment stelt zich een evenwicht in: er ontsnappen per seconde evenveel moleculen uit de vloeistof, als er weer ingevangen worden. We zeggen ook wel dat de lucht dan verzadigd is met damp. De bijbehorende dampdruk heet dan ook de **verzadigde dampdruk**. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer damp de lucht kan bevatten en dus hoe hoger de verzadigde dampdruk.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 36 – 39 maken.

Een vloeistof bereikt zijn **kookpunt** bij die temperatuur, waarbij de verzadigde dampdruk gelijk is aan de omgevingsdruk. Voor water onder standaard luchtdruk is dat bij 100 °C. Bij het kookpunt vindt verdamping door de hele vloeistof plaats en niet alleen aan het oppervlak. De gasdeeltjes verzamelen zich in bellen. Beneden het kookpunt kunnen die bellen niet gevormd worden doordat de dampdruk kleiner is dan de omgevingsdruk. Bij het kookpunt wordt de druk in de bellen groot genoeg om de luchtdruk + waterdruk te weerstaan.

Begrippen

Ideaal gas
Reëel gas
Van der Waalskrachten
Verzadigde dampdruk
Damp
Dampdruk
Verzadigde dampdruk
Kookpunt

Samenvatting

Je kunt:

- uitleggen wat met een ideaal en wat met een reëel gas wordt bedoeld;
- met het deeltjesmodel beschrijven wat er gebeurt op molecuulniveau bij faseovergangen;
- de invloed van Van der Waalskrachten aangeven;
- uitleggen wat het verband is tussen verzadigde dampdruk en de temperatuur

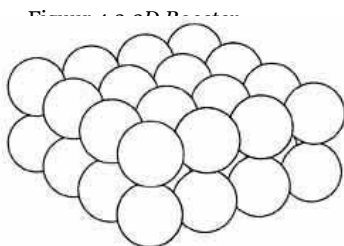
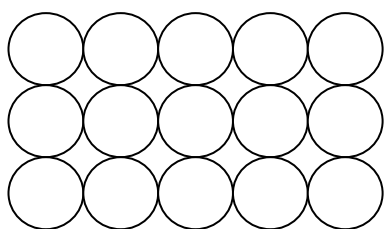
Opgaven

§4.1

30 Molecuulafstanden

Bereken de gemiddelde afstand tussen luchtmoleculen onder normale omstandigheden ($p = p_0$ en $T = 20$ °C). Beschouw de moleculen als puntvormig.

§4.3



31 Roosters

De rangschikking van deeltjes in een vaste stof gaat vaak (maar niet altijd!) op een regelmatige manier. We zeggen dan wel dat de deeltjes in een rooster zitten. In twee dimensies kunnen we deeltjes in een rooster bijvoorbeeld als volgt tekenen (figuur 4.3).

- Bedenk zelf een tweedimensionaal rooster waarin de deeltjes (cirkels) zo dicht mogelijk opeengepakt zitten.

Uiteraard zijn de deeltjes van een stof driedimensionaal. Als we het hierboven getekende tweedimensionale rooster naar drie dimensies uitbreiden krijgen we het volgende plaatje (figuur 4.4).

- Probeer met een aantal knikkers jouw bij a) getekende rooster naar drie dimensies uit te breiden.
- Kun je nog een ander driedimensionaal rooster maken met de knikkers?

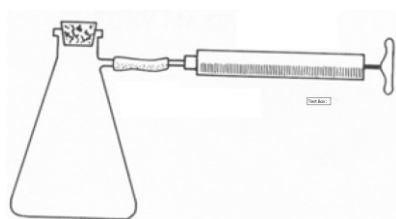
§4.4

Figuur 4.4 3D Rooster

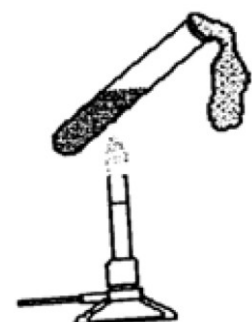
32 Hoe ziet het eruit?

- Schets een vat met daarin:
 - Veel lucht
 - Een beetje lucht
 - Veel water
 - Een beetje water
- We hebben een erlenmeyer fles met lucht. Dan gebruiken we een pompje om de helft van de lucht eruit te halen (zie figuur 4.5). Stel dat we een magische bril hadden en de lucht konden zien. Teken de lucht in de fles:
 - Voordat we de helft eruit zuigen
 - Nadat de helft eruit gezogen is
- Bekijk figuur 4.6. Geef een deeltjesverklaring voor het volgende: wanneer het water in de reageerbuis aan de kook wordt gebracht, dan gaat de ballon bol staan. Teken de bolle ballon en geef de deeltjes in de ballon aan. Wat voor deeltjes zijn het?
- Een natte schotel ligt te drogen op het aanrecht en na een tijdje is het droog. Wat gebeurt er met het water?
 - Het water gaat in het schotel.
 - Het water droogt op en bestaat niet meer.
 - Het water verandert in waterstof en zuurstof in de lucht.
 - Het water gaat de lucht in als kleine stukjes water.

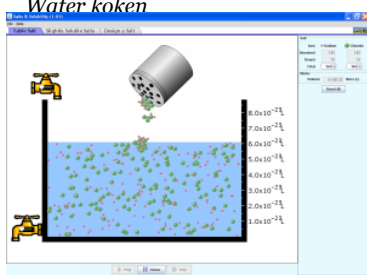
Licht je antwoord toe.



Figuur 4.5
Erlenmeyer met lucht



Figuur 4.6
Water koken



Figuur 4.7 Applet

33 Verklaar maar

Verklaar met een deeltjesmodel:

- De stevigheid van een vaste stof;
- De verspreiding van een gas in een ruimte;
- Diffusie van vloeistoffen en gassen;
- Het condenseren van een gas;
- Het stollen van een vloeistof;
- Wat je ziet gebeuren op (figuur 4.7): [PhET Interactive Simulations: Salts & Solubility](#)

§4.5

34 Verdampen

Leg uit waarom verdampen een proces is dat aan de oppervlakte van een vloeistof plaatsvindt.

35 Koken

Leg uit hoe het komt dat de temperatuur van een kokende vloeistof niet stijgt, ondanks het toevoeren van energie. Hint: waarvoor wordt de energie gebruikt bij het kookpunt? En waarvoor niet?

§4.6

36 Verdamping en condensatie (antwoord op p. 52)

Als het waterniveau in een glas met water na een dag onveranderd is, kun je dan concluderen dat er geen verdamping of condensatie heeft plaatsgevonden?

37 Verzadigde dampdruk

- Waardoor leidt een hogere temperatuur tot een hogere verzadigde dampdruk?
- Waardoor droogt wasgoed sneller in de wind dan zonder wind?

38 Luchtvochtigheid

De luchtvochtigheid geeft aan hoe groot de dampdruk van waterdamp in de lucht is, ten opzichte van de verzadigde dampdruk:

$$\text{luchtvochtigheid} = \frac{\text{dampdruk}}{\text{verzadigde dampdruk}} \cdot 100\%$$

- Wat betekent een luchtvochtigheid van 100%?
- Verklaar de vorming van dauwdruppels na een koele nacht.
- Een metalen plaat wordt in lucht van 20 °C geplaatst en langzaam afgekoeld. Als de plaat 5 °C is, wordt er water zichtbaar op het oppervlak. Wat is blijkaar de luchtvochtigheid van de lucht van 20 °C?

39 Verklaar...

- ... waarom groente in een snelkookpan (waarin een hoge druk heerst) sneller gaar wordt.
 - ... waarom het koken van een ei bovenop een berg langer duurt dan op zeeniveau.
-

5 Nog meer temperatuureffecten

Hoofdstukvragen	Waardoor zetten stoffen uit? Hoe gaat warmteoverdracht in zijn werk?
-----------------	---

Temperatuur is een belangrijke factor in het gedrag van stoffen en materialen. Temperatuur bepaalt in grote mate het gedrag van gassen en ook faseovergangen hangen met temperatuur samen. Dat temperatuur nog meer invloed op stoffen en materialen heeft, gaan we in dit hoofdstuk bekijken. Zo zul je erachter komen waarom stoffen uitzetten bij temperatuurstijging en wat er gebeurt bij temperatuurverschillen.

5.1

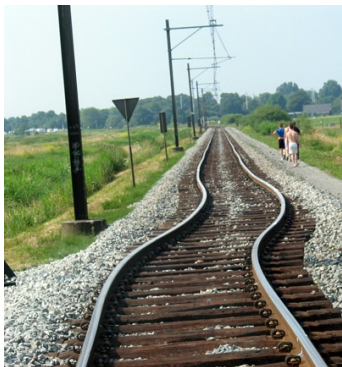
Uitzetten en krimpen

Lees eerst het volgende krantenbericht (Algemeen Dagblad, 03-07-2006).

Trein ontspoord op zigzag-rails

ZWAMMERDAM – De huidige tropische temperaturen in combinatie met een wolkenloze hemel veroorzaken ongelukken op het spoor. In de afgelopen dagen is een aantal treinen ontspoord doordat de rails door de hitte uitzetten en er een knik ontstaat. [...]

In dit bericht wordt een bekend verschijnsel besproken: materie zet uit als de temperatuur stijgt: **thermische expansie** met een mooi woord. Uitzetten is echter niet alleen kommer en kwel. Een kwikthermometer maakt er juist dankbaar gebruik van en in veel elektrische circuits zit een zogenaamd bimetaal opgenomen als temperatuurgevoelige schakelaar (zie het blok extra).



Figuur 5.1 Krachten bij uitzetting

Extra - bimetaal

Een bimetaal bestaat uit twee strookjes van verschillende metalen die op elkaar geplakt zijn ('bi' = twee). Doordat de metalen een verschillende uitzetting hebben, zal het strookje kromtrekken. In een koelkast trekt bijvoorbeeld een bimetaal krom als het te warm wordt. Het gekromde bimetaal sluit dan een elektrisch circuit en de koelkast gaat weer koelen.

Thermische expansie van volume

Wanneer de temperatuur van een stof verandert, heeft dit invloed op het volume. De onderstaande vergelijking geeft weer wat de volumeverandering van een stof is, als gevolg van een temperatuurverandering.

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

Symbolen: ΔV is de volumeverandering in kubieke meters (m^3), V_0 is het beginvolume in m^3 , ΔT is de temperatuurverandering in Kelvin (K) en γ is de kubieke uitzettingscoëfficiënt in K^{-1} .

De waarde van de kubieke uitzettingscoëfficiënt verschilt per stof. In de tabellen 8 en 11 van BiNaS zijn een aantal waarden opgenomen.

Natuurlijk kan de temperatuur ook dalen. ΔT is in dat geval negatief, daardoor zal ook ΔV negatief zijn: de stof krimpt.

Voor vaste stoffen wordt naast de kubieke uitzettingscoëfficiënt ook vaak (zo niet vaker) gewerkt met de **lineaire uitzettingscoëfficiënt**. Deze geeft de mate van uitzetting in één richting weer:

Opgaven

Je kunt nu opgaven 40 – 49 maken.

Thermische expansie van lengte

De onderstaande vergelijking geeft weer wat de lengtetoeename van een vaste stof is, als gevolg van een temperatuurstijging.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

Symbolen: ΔL is de lengtetoeename in meters (m), L_0 is de beginlengte in m, ΔT is de temperatuurverandering in Kelvin (K) en α is de lineaire uitzettingscoëfficiënt in K^{-1} .

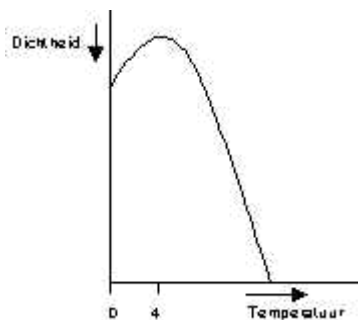
Geldigheid: deze vergelijking geldt alleen voor vaste stoffen.

Tot slot: hoe zit het met de deeltjes? Eigenlijk vrij eenvoudig. Om te kunnen trillen heeft een deeltje ruimte nodig: het veert tussen zijn burens heen en weer. Bij hogere temperatuur is de snelheid van het deeltje in de evenwichtsstand groter, en zal het een grotere maximale uitwijking krijgen. Daardoor worden de buurdeeltjes opzij gedrukt en zal de stof uitzetten.

5.2

Water: een geval apart

Geen regels zonder uitzonderingen... In het geval van uitzetten en krimpen is dat onder andere het 'doodgewone' water!



Figuur 5.2
Dichtheidscurve van water

In figuur 5.2 zie je de dichtheidscurve voor water. Het afkoelen van water verloopt tot 4 °C vrij normaal: water krimpt en de dichtheid neemt toe. Beneden 4 °C gebeurt er echter iets vreemds: water zet weer uit en de dichtheid neemt af!

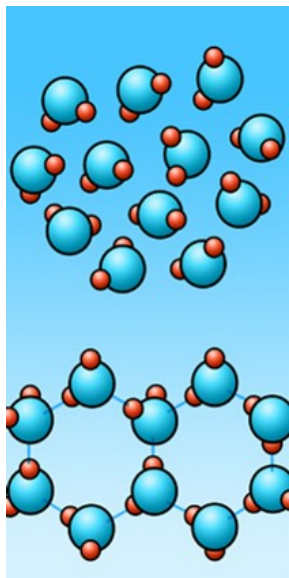
En dat is nog niet alles. Als een vloeistof stolt tot een vaste stof komen de deeltjes meestal dichter bij elkaar te zitten en neemt de dichtheid flink toe. Maar niet bij water! Als het stolt tot ijs wordt de dichtheid juist lager. Ijsklontjes blijven dan ook drijven in een glas frisdrank.

Met het deeltjesmodel dat we tot nu toe hebben gebruikt, is dit gedrag niet te verklaren. We maken daarom even een uitstapje naar een ander model, speciaal voor water. Als we een waterdeeltje namelijk wat nader gaan bekijken, blijkt het een molecuul te zijn, dat bestaat uit twee waterstofatomen (H) en één zuurstofatoom (O).

In vloeibaar water bewegen deze moleculen net als de deeltjes in iedere andere vloeistof langs elkaar heen. Maar in ijs vormen zich *waterstofbruggen* tussen de moleculen, waardoor een heel open kristalstructuur ontstaat en de moleculen per saldo meer ruimte innemen (figuur 5.3). De karakteristieke

Opgaven

Je kunt nu opgaven 50 en 51 maken.



5.3

Figuur 5.3 Water in vloeistof- en vaste fase

zeshoekige vorm van het kristalrooster zie je bijvoorbeeld terug in sneeuwvlokken.

Tijdens het afkoelen van water begint de kristalstructuur van ijs zich al bij 10 °C af te tekenen, en het krimpen tegen te werken. Bij 4 °C zijn beide effecten in evenwicht. Vandaar dat water bij die temperatuur de hoogste dichtheid heeft.

Extra

Een waterstofbrug is een Van der Waals kracht tussen een elektronenpaar op een sterk elektronegatief atoom (bijvoorbeeld zuurstof) en een naburig H-atoom gebonden aan een ander sterk elektronegatief atoom. De waterstofbruggen in ijs zijn aangegeven in figuur 5.3 door middel van streepjes.

Warmtegeleiding

Wie is het nou niet overkomen? Je laat per ongeluk je metalen lepel in een bord hete soep staan en als je de lepel eruit wilt halen, brand je je vingers. Wat in de lepel heeft plaatsgevonden kennen we onder de naam **warmtegeleiding**.

Warmtegeleiding vindt plaats tussen twee plekken met een verschillende temperatuur. In het geval van de soep is dat het uiteinde van de lepel dat in de soep steekt, en het uiteinde buiten de soep. Bij warmtegeleiding wordt energie van de plek met de hoge temperatuur naar de plek met de lage temperatuur getransporteerd totdat de temperatuur overal gelijk is.

Niet alle stoffen geleiden even goed. Het uiteinde van een kunststof lepel in dezelfde soep zal bijvoorbeeld veel minder snel heet worden. In het algemeen geldt dat metalen erg goede warmtegeleiders zijn.

Geleidingsvermogen

Vraag:

Leg uit waarom op een winterse dag ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) de handvatten van jouw fietsstuur veel minder koud aanvoelen dan het stuur zelf.

Antwoord:

De handvatten van je stuur zijn gemaakt van kunststof, terwijl het stuur zelf van metaal is. Metaal is een betere warmtegeleider dan kunststof en er zal dus sneller energie van je handen naar het stuur getransporteerd worden, dan van je hand naar de handvatten. Hierdoor voelt het stuur kouder aan dan de handvatten.



Figuur 5.4 Een fietsstuur voelt niet overal even koud aan.

Met het deeltjesmodel voor stoffen is te begrijpen waarom en hoe warmtegeleiding plaatsvindt. De samenhang tussen temperatuur en deeltjesbeweging is inmiddels al vaak aan bod gekomen en speelt ook in dit geval een grote rol. Op de plek met de hoge temperatuur bewegen de deeltjes relatief heftig. Bij botsingen met hun minder heftig bewegende buurdeeltjes zullen ze een

beetje van hun energie afstaan, waardoor ook deze buurdeeltjes heftiger gaan bewegen. De buurdeeltjes botsen op hun beurt weer met hun burens enzovoort, enzovoort: energie verplaatst zich naar de 'koudere' plek en de temperatuur zal daar stijgen.

Temperatuur en inwendige energie: twee begrippen die veel met elkaar te maken hebben, maar zeker niet hetzelfde zijn!

Extra – temperatuur en inwendige energie

Temperatuur is een maat voor de gemiddelde kinetische energie per mol. Omdat het per mol is, maakt het voor de temperatuur niet uit hoeveel mol of moleculen er zijn. De temperatuur van 1 liter kraanwater is hetzelfde als de temperatuur van 2 liter water uit dezelfde kraan. Naast kinetische energie bezitten de moleculen van vloeistoffen en vaste stoffen ook potentiële energie. Ze trekken elkaar immers aan, een beetje zoals de aarde massa's aantrekt. De kinetische en potentiële energie van alle moleculen van een stof samen noemen we inwendige energie. Die is wel afhankelijk van de hoeveelheid materie. Twee liter kraanwater heeft 2x zoveel inwendige energie als 1 liter kraanwater van dezelfde temperatuur. Door verwarmen van een stof kunnen we de inwendige energie verhogen. Moleculen gaan sneller bewegen – hogere kinetische energieën/of komen verder uit elkaar te liggen – hogere potentiële energie. Het laatste geldt bijvoorbeeld voor verdamping.

Opgaven

Je kunt nu opgaven 52 – 57 maken.

Extra – stroming, straling en geleiding

Warmtegeleiding wordt vaak in een adem genoemd met warmtestroming en warmtestraling als het gaat om energietransport dat door temperatuurverschillen wordt veroorzaakt. Ook bij warmtestroming en warmtestraling gaat energie van een plek met hoge temperatuur naar een plek met lage temperatuur.

Bij *warmtestraling* vindt het transport plaats door de uitwisseling van straling ('energiepakketjes') tussen 'warme' en 'koude' plek. Doordat de warme plek meer energie via straling afstaat dan de koude plek, is er netto energietransport van warme naar koude plek. In tegenstelling tot warmtegeleiding hoeven warme en koude plek bij warmtestraling niet direct met elkaar in contact te staan. De opwarming van de aarde door de zon vindt bijvoorbeeld vrijwel uitsluitend plaats via warmtestraling.

Bij *warmtestroming* wordt, in tegenstelling tot geleiding en straling, niet zozeer energie overgedragen van warme naar koude plek, maar verdringt de warme plek in feite de koude plek. De verwarming in je huiskamer zorgt er bijvoorbeeld – via geleiding en straling! – voor dat de lucht boven de verwarming in temperatuur stijgt. Aangezien warme lucht een lagere dichtheid heeft dan koude lucht, zal deze opstijgen en zo de plek van de hoger gelegen koude lucht innemen. De warme lucht is nu ver van de verwarming verwijderd en zal afkoelen, terwijl de verdreven koude lucht in contact komt met de verwarming en zal opwarmen. Het proces van opstijgen en dalen gaat zich herhalen en er ontstaat een continue stroming van lucht. Logischerwijs kan warmtestroming alleen plaatsvinden in stoffen die kunnen stromen: vloeistoffen en gassen.

5.4

Warmtecapaciteit

Bij voorwerpen die zijn samengesteld uit meerdere stoffen, is het handig om met de zogenaamde **warmtecapaciteit** C te werken. Dit is de hoeveelheid energie die nodig is om het voorwerp $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in temperatuur te laten stijgen. In dit geval luidt de formule voor de **warmteoverdracht** Q :

$$Q = C \cdot (T_{\text{eind}} - T_{\text{begin}})$$

Als twee of meer stoffen met een verschillende temperatuur met elkaar in contact worden gebracht, zal er warmteoverdracht plaatsvinden: de stof met de lagere temperatuur neemt energie op die de andere stof afstaat. Daarbij zal de temperatuur van de ene stof toenemen en van de andere afnemen.

Warmteoverdracht kan doorgaan totdat alle stoffen een gelijke temperatuur hebben bereikt.

Hoeveel de temperatuur stijgt of daalt, hangt af van de warmtecapaciteit van de stof. De warmtecapaciteit per eenheid van massa wordt de **soortelijke warmte** c van een stof genoemd.

Vanwege energiebehoud kunnen we voor warmteoverdracht schrijven:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots \text{etc.} = 0 = Q_{\text{totaal}}$$

Hierbij stelt elke Q de opgenomen dan wel afgestane energie voor, uit te rekenen met de vorige formule.

Natuurlijk kan een stof ook dalen in temperatuur. Ook nu is bovenstaande formule bruikbaar, maar dan geeft Q de vrijgekomen hoeveelheid energie weer.

Warmtecapaciteit en soortelijke warmte

$$Q = C \cdot \Delta T$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Symbolen: Q is de warmteoverdracht, dat is de hoeveelheid energie die toegevoegd wordt aan een object in Joule (J);

C is de warmtecapaciteit van een stof in Joule per Kelvin (JK^{-1});

c is de soortelijke warmte van de stof waarvan het object gemaakt is in Joule per kilogram Kelvin ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

m is de massa van het object in kilogram (kg);

ΔT is de temperatuurverandering ($T_{\text{eind}} - T_{\text{begin}}$) in Kelvin.

Warmteoverdracht bij water

Vraag

Een hoeveelheid water van $0,3 \text{ dm}^3$ met een temperatuur van 20°C wordt in contact gebracht met een hoeveelheid water met een temperatuur van 90°C . Onder invloed hiervan zal het water van 20°C stijgen in temperatuur naar 60°C . Het water van 90°C zal dalen in temperatuur naar 60°C . Bereken het volume van het water dat in temperatuur daalt.

Antwoord

$$c_{\text{water}} = 4186 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}, \rho_{\text{water}} = 0,998 \text{ kgdm}^{-3}$$

$$m_{\text{water}} = \rho_{\text{water}} \cdot V_{\text{water}} = 0,998 \cdot 0,30 = 0,30 \text{ kg}, \Delta T = 40^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{opgenomen}} = Q_{\text{afgegeven}}$$

$$4186 \cdot 0,30 \cdot 40 = 4186 \cdot m \cdot 30 \Rightarrow m = 0,40 \text{ kg}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,40}{0,998} = 0,4 \text{ dm}^3$$

Opgaven

Je kunt nu opgaven 58 – 66 maken.

Begrippen

Thermische expansie
Thermische expansie van volume
Lineaire uitzettingscoëfficiënt
Thermische expansie van lengte
Warmtegeleiding
Warmte
Warmtecapaciteit
Soortelijke warmte

Samenvatting

Je kunt:

- uitleggen wat er met de verschijnselen thermische expansie en warmteoverdracht bedoeld wordt;
- deze verschijnselen verklaren met het deeltjesmodel;
- berekeningen uitvoeren met de formules voor thermische expansie;
- het bijzondere gedrag van water in het temperatuurbereik $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ beschrijven;
- uitleggen wat er met het begrip warmteoverdracht bedoeld wordt;
- de isolerende werking van verschillende materialen uitleggen, gebruikmakend van het begrip warmtegeleiding;
- verschil uitleggen tussen soortelijke warmte en warmtecapaciteit;
- berekeningen uitvoeren met soortelijke warmte en warmtecapaciteit.

Opgaven

§5.1

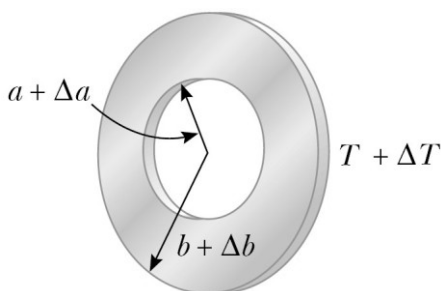
40 Rails (antwoord op p. 52)

Een ijzeren treinrail heeft een lengte van 30 meter, bij een temperatuur van 5°C .

- a. Wat is de lengte van de treinrail op een hete dag bij $40\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- b. En wat is de lengte van de trainrail als het zeer hard vriest bij -30°C ?

41 Uitzettingscoëfficiënt (antwoord op p. 52)

- a. Rubber heeft een negatieve lineaire uitzettingscoëfficiënt. Wat gebeurt er met een stuk rubber als het wordt verwarmd?
- b. Welk teken heeft de uitzettingscoëfficiënt van H_2O (positief of negatief) onder en boven de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$?



Figuur 5.5 Een ring met een gat erin wordt verwarmd en zet uit.

42 Tussen moleculen zit wat?

Wat zit er in de open ruimtes tussen de ijskristallen van figuur 5.3? Lucht? Waterdamp? Niets?

43 Uitzetting van een gat

In figuur 5.5 is een metalen ring weergegeven met een gat erin. De ring wordt verwarmd. Wat gebeurt er met het gat?

- A Het gat wordt kleiner.
- B Het gat wordt groter.
- C Het gat blijft gelijk van grootte.
- D Er is niet genoeg informatie om deze vraag te beantwoorden.

44 Uitzettende treinrails

- Bij $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is de ruimte tussen twee ijzeren railstaven $8,5\text{ mm}$. Bij welke temperatuur komen de staven precies tegen elkaar aan te liggen? De railstaven zijn 12 meter lang. Ga uit van lineaire uitzetting.
- Hoeveel warmte moet er in dat geval aan een staaf zijn toegevoerd? De doorsnede van een staaf is $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$.
- Op hete zomerdagen kan de temperatuur van de rails oplopen tot wel $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hoeveel ruimte komen de staven dan tekort?

45 Bimetaal

Een bimetalen strip bestaat uit koper en aluminium. Buigt de strip naar de aluminiumkant, of naar de koperkant bij temperatuurverhoging? Licht je antwoord toe.

46 Kubieke uitzetting

- Leg uit dat je een deuk uit een pingpongbal kunt krijgen door hem in heet water te leggen.
- De hoeveelheid water op aarde wordt geschat op $1,4 \cdot 10^9\text{ km}^3$. Hoeveel meter stijgt de zeespiegel als de aarde gemiddeld $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmer wordt? Bedenk dat 70% van het aardoppervlak met water bedekt is.

Voor de kubieke uitzettingscoëfficiënt van vaste stoffen geldt ongeveer $\gamma = 3 \cdot \alpha$, waarbij α de lineaire uitzettingscoëfficiënt is.

- Vergelijk typische waarden voor γ van vaste stoffen met die van vloeistoffen en gassen. Wat valt je op?
- Leg uit dat een kwikthermometer niet zou werken als hetgeen je bij c) hebt gevonden niet het geval zou zijn.

47 Groter of kleiner?

Stel dat je een metalen plaat hebt met een gat erin. Wordt dit gat groter of juist kleiner als het metaal gaat uitzetten? Leg uit.

Valkuil

Wanneer de temperatuur van een object groter wordt, zet het materiaal in *alle* richtingen evenveel uit. Dit betekent dat ook als er een gat in het materiaal zit, dit gat in grootte toeneemt op een manier alsof het gat met materiaal gevuld zou zijn.

48 IJzeren ring

Een ring kan enorm stevig om een cilinder vastgemaakt worden. Hiervoor neem je een ring met een binnendiameter die kleiner is dan de diameter van de cilinder. Vervolgens verwarm je de ring zodat deze uitzet. De ring past dan om de cilinder heen en na afkoelen klemt hij zich vast. Op deze manier werden vroeger bijvoorbeeld ijzeren 'banden' om treinwielen heen gelegd.

- We hebben bij $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ een ijzeren ring met een binnendiameter van 10 cm . Tot welke temperatuur moeten we de ring tenminste verwarmen, om deze rond een koperen cilinder van $10,1\text{ cm}$ doorsnede te kunnen schuiven?
- Waarom is er geen gevaar dat de ring bij hitte weer van de cilinder afglijdt?

49

Metalen doppen op glazen potten kunnen vaak losser worden gemaakt door heet water over de dop te laten stromen. Waarom werkt dit?

§5.2

50 Vraagjes over water

- Waarom barst een tot de rand gevulde fles water in de vriezer?
- Moeten we bang zijn dat een kwikthermometer ook barst als het kwik beneden zijn vriespunt komt?
- Wat is waarschijnlijk de watertemperatuur op de bodem van een bevroren meer?

51 Vriespuntverlaging

Door het uitoefenen van een kracht kunnen we het vriespunt van water een beetje verlagen. Het uitoefenen van kracht op ijs kan er daardoor voor zorgen dat het gaat smelten. Leg vanuit deeltjesoogpunt uit wat er dan gebeurt met het ijs.

§5.3

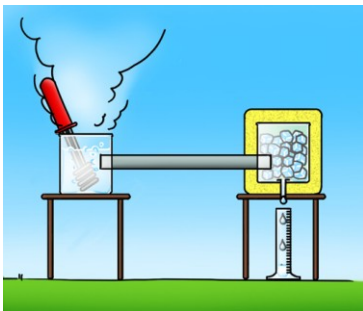
52 Waardoor...

- ... voelt je metalen fietsstuur 's winters koeler aan dan de rubberen handvaten?
- ... kun je je hand veilig even in het midden van een oven van 200 °C steken, maar brand je je vrijwel direct als je de metalen wand aanraakt?
- ... voelt lucht van 20 °C best aangenaam, maar water van 20 °C behoorlijk fris?
- ... hoeft lopen over hete kolen niet perse verkeerd af te lopen?
- ... worden handvaten van pannen vaak van kunststof gemaakt?
- ... geleiden vloeistoffen en gassen in het algemeen minder goed dan vaste stoffen?

53 Geleidingscoëfficiënt

Hoe goed een stof de warmte kan geleiden, kunnen we karakteriseren aan de hand van de warmtegeleidingscoëfficiënt k : hoe hoger de waarde hiervan, hoe beter de warmtegeleiding. Warmtegeleidingscoëfficiënten staan in Binas.

Twee bliken zijn verbonden door een ijzeren staaf (figuur 5.6). In het ene bevindt zich kokend water, het andere is geïsoleerd en gevuld met ijs. Door de warmtegeleiding in de 10 cm lange staaf smelt het ijs dat wegloopt door een gaatje in de bodem.



Figuur 5.6 Geleiding door een staaf

Voor het door de staaf doorgegeven vermogen P geldt:

$$P = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L}; \text{ } A \text{ oppervlakte van de staafdoorsnede, } L \text{ lengte van de staaf}$$

- Hoe groot is ΔT in dit geval?
- Na een kwartier heb je 100 ml water opgevangen. Hoeveel energie is hiervoor nodig geweest?
- Wat was blijkbaar de diameter van de ijzeren staaf?
- We vervangen de ijzeren staaf door een aluminium staaf van dezelfde afmetingen. Hoe lang duurt het nu voordat er 100 ml water is gevormd?

54 Kaars

Waardoor kun je je hand zonder problemen vlak naast een kaarsvlam houden, maar niet erboven?

55 Sneeuwpop

Bediscussieer met enkele klasgenoten of een sneeuwpop in de zon eerder smelt mét, of zonder jas aan. Geef argumenten voor en tegen.

56 Verwarmen

Streep door wat niet van toepassing is:

- Temperatuurstijging duidt op een toename van de kinetische/potentiële energie van de moleculen van een stof.
- Een faseovergang duidt op een toename van de kinetische/potentiële energie van de moleculen van een stof.

Vorm jezelf een mening over de volgende stelling:

- Het verwarmen van een stof zorgt altijd voor een stijging van de temperatuur.

57 Discussies over warmte en temperatuur

Bespreek de volgende stellingen:

- 2 liter water heeft meer inwendige energie dan 1 liter water van dezelfde temperatuur.
- Heet water geeft zijn temperatuur af aan koud water als de twee gemengd worden.
- Met twee branders bereikt water een hoger kookpunt dan met één brander.
- Met twee branders bereikt water zijn kookpunt eerder dan met één brander.
- We verwarmen 1 liter water met een brander. Daarna verwarmen we 2 liter water even lang met dezelfde brander. De toename van de inwendige energie is in beide gevallen gelijk, dus ook de eindtemperatuur.
- IJsmoleculen van 0 °C bewegen even snel als watermoleculen van 0 °C.

§5.4 en §5.5

58 Temperatuurtoename en energie (antwoord op p. 52)

Stel je hebt een kilo ijzer, een kilo glas en een kilo water. Alle drie de stoffen hebben dezelfde temperatuur van 10 °C. Rangschik de stoffen van hoog naar laag wat betreft hun temperatuur na het toevoegen van 100 J aan energie aan iedere stof (hint: gebruik je BINAS).

59 Soortelijke warmte (antwoord op p. 52)

Beschouw dezelfde stoffen als in de vorige opgave. Rangschik de stoffen van laag naar hoog wat betreft de hoeveelheid energie die moet worden toegevoegd in de vorm van warmte, als de temperatuur van iedere stof stijgt naar 20 °C

60 Temperatuur voelen?

Geef een voorbeeld waaruit blijkt dat je niet kan beoordelen wat de temperatuur van een stof is, door het alleen maar aan te raken en te bekijken hoe warm of hoe koud het aanvoelt.

61 Water verwarmen

Veel mensen koken op gas. Hierbij wordt aardgas verbrand om bijvoorbeeld water te verwarmen.

- Zoek in BINAS de soortelijke warmte van water op. Waarom staat er als eenheid $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ en niet $\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$?
- Zoek in BINAS de stookwaarde van (Gronings) aardgas op. Wat geeft de stookwaarde weer?
- Hoeveel gram (Gronings) aardgas is nodig om 500 ml water van 15 °C net aan de kook te brengen?

62 Discussies over warmte en temperatuur

Het water uit opgave 49 heeft gekookt in een 2,0 kg wegende roestvrijstalen pan. De pan heeft daardoor ook een temperatuur van 100 °C. Om de pan met de 500 ml water af te koelen giet je er 4,5 l water van 15 °C bij.

- Wat wordt de eindtemperatuur van het geheel?
- Zal de eindtemperatuur in werkelijkheid hoger of lager liggen? Waarom?

63 Vallende kogel

Verwarming van een stof hoeft niet altijd via een vlam of andere directe warmtebron te gebeuren. Als je bijvoorbeeld een kogel op een stuk ijzer laat vallen zal het ijzer een beetje warm worden.

- Welke energieomzettingen vinden hier plaats?
- We laten een kogel (1,0 kg) van 1,0 m hoogte op een ijzeren plaatje (20 gram) vallen. Met hoeveel graden stijgt de temperatuur van het plaatje als het 40% van de vrijgekomen energie opneemt?
- Waar gaat de rest van de energie heen?

64 Soortelijke warmte en warmtecapaciteit

- Waarom staat soortelijke warmte wel, en warmtecapaciteit niet in BINAS?
- Wat is de warmtecapaciteit van 3,0 liter water?
- Een pan bestaat uit 1,5 kg roestvrij staal en 100 gram polyetheen voor de handvaten. Wat is de warmtecapaciteit van deze pan?
- Je fiets ($C = 1,7 \text{ kJ K}^{-1}$) staat in de volle zon en ontvangt een vermogen van 100 W aan zonne-energie. Na hoeveel minuten is de temperatuur van je fiets met 50 °C gestegen, als je er vanuit gaat dat je fiets geen warmte aan zijn omgeving afstaat?

65 Waardoor...

- ... kun je je tong branden aan de vulling van een bitterbal, terwijl je met de korst geen problemen hebt?
- ... vliegt een papieren bakje, gevuld met water, niet in de brand als je het boven een vlam houdt?
- ... hebben landen aan zee een gematigder klimaat dan landen in het binnenland?

- d. ... kan het gebruik van een thermometer een temperatuurmeting juist verstoren?

66 Water in verschillende vormen

- a. Hoeveel kg ijs kun je laten smelten, door 1,0 kg waterdamp te laten condenseren?
 - b. Waardoor krijg je door waterdamp van 100 °C ergere brandwonden dan door water van 100 °C?
 - c. Je wilt een glas water (= 200 ml) afkoelen door er ijsklontjes van 0 °C bij te doen. Hoeveel °C koelt het water af door het smelten van twee ijsklontjes van 8,0 cm³? Verwaarloos de invloed van het glas.
 - d. Als de temperatuur van het glas water voor het smelten van de ijsklontjes 20 °C was, wat is dan de eindtemperatuur als water en smeltwater volledig gemengd zijn?
-

6 Moderne ontwikkelingen

Hoofdstukvragen	Welke moderne ontwikkelingen op materiaalgebied zijn er?
-----------------	--

Elke stof heeft een unieke combinatie van eigenschappen, die samenhangt met de manier waarop de stof is opgebouwd. Soms is de opbouw zo bijzonder, dat een stof eigenaardig gedrag vertoont. Zo hebben we al gezien dat water door zijn speciale kristalstructuur afwijkend uitzetgedrag vertoont. Maar er is nog veel meer! Veel bijzondere stoffen leiden tot spectaculaire toepassingen.

6.1 Korte terugblik

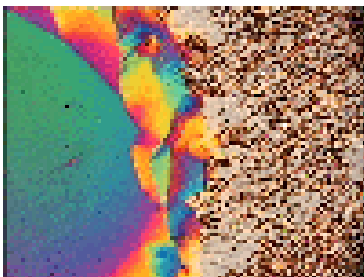
We hebben in deze lessenserie een begin gemaakt met deeltjesmodellen. Met behulp van een eenvoudig model zijn we er toch in geslaagd een deel van het algemene gedrag van stoffen te beschrijven. We hebben echter ook nog een groot deel aan eigenschappen buiten beschouwing gelaten. Veel van deze eigenschappen vragen om een ingewikkelder model.

In dit hoofdstuk zul je aan de hand van groepsopdrachten samen met een aantal klasgenoten ruiken aan ingewikkelder modellen, die enkele bijzondere moderne ontwikkelingen op materiaalgebied kunnen verklaren.

Groepsopdracht

In bijlage C vind je algemene uitleg over de groepsopdracht. Kies een van de materialen uit de volgende paragrafen voor de opdracht. In overleg met je docent kun je misschien zelf nog voor een ander nieuw materiaal kiezen.

6.2 Vloeibare kristallen



Figuur 6.1 Vloeibaar kristal

Inleiding

Vloeibare kristallen (figuur 6.1) : dat kan toch niet? Een kristal kan toch niet vloeibaar zijn? Tegelijk in de vaste en in de vloeibare fase verkeren? Hoe zit dat dan met die deeltjes?

Een vloeibaar kristal (LC: liquid crystal) is materiaal dat zich in een toestand bevindt die eigenschappen van de vaste –kristallijne- en vloeibare fase in zich verenigt. De eigenschappen ervan veranderen afhankelijk van de richting waarin men kijkt.

De toepassingen ervan zijn spectaculair: LCD schermen voor telefoon, rekenmachine en TV.

Lees erover in bijgaande bronnen.

Opdracht

Je legt je klasgenoten uit wat vloeibare kristallen zijn. Waardoor zijn ze zo bijzonder? Waar vind je toepassingen of worden die voorzien?

Leg met behulp van een deeltjesmodel uit waarom vloeibare kristallen zo bijzonder zijn.

Laat een toepassing zien, een simulatie of een rekenmodel. Leg de werking uit. Maak gebruik van onderstaande bron; zoek daarna zelf verder.

Bronnen

 [Wikipedia: Vloeibaar kristal](#)

 [Het Klokhuis: LCD](#)

 [How stuff works: LCD](#)

6.3 Zelfherstellende materialen

Inleiding

Stel je voor: je scooter knalt tegen een boom en verkreukelt, je snijdt je in je vingers en bloedt hevig,.... Een pleister erop en na verloop van tijd is de snee praktisch onzichtbaar. In het geval van de scooter treedt herstel niet zo gemakkelijk op: je moet rekening houden met 'total loss'. Zou het niet geweldig zijn, als je ook dan een plakkertje over de breuk zou kunnen plakken, waarop die zich spontaan herstelt? Of als een kras vanzelf herstelt? Of verf die zichzelf herstelt? Toekomstmuziek? In ieder geval zijn voor zelfherstellende materialen heel wat toepassingen te bedenken...

Meng maïzena met een klein beetje water zodat een stevig balletje ontstaat. Maak er een scheur in en wacht vervolgens even: de scheur is onzichtbaar geheeld. Het materiaal herstelt zich, net als je huid na dat sneetje. Hoe werkt dat microscopisch? Kun je nog meer voorbeelden van zelfherstellende materialen vinden? Nog meer toepassingen bedenken?

Self healing materials vormen een jong onderzoeksgebied, dat tussen natuur- en scheikunde inzit, en vooral zeer veel boeiende toepassingsmogelijkheden heeft.

Opdracht

Je toont je klasgenoten een voorbeeld van zelfherstellend materiaal. Leg uit hoe je deze macroscopische verschijnselen microscopisch kunt verklaren. Geef nog enkele voorbeelden van materialen die zelfherstellend gedrag vertonen.

Laat een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van toepassingen van zelfherstellende materialen.

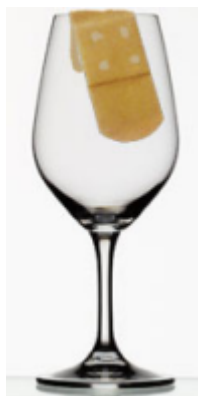
Bronnen

 [Delft Centre for Materials](#)

 [Tudelta; Materiaal genees jezelf](#)

 [Wikipedia; Self healing material](#)

 [Kennisslink; een kras die vanzelf verdwijnt](#)



Figuur 6.2 Zelfherstellend glas?

6.4

Granulaire materie



Figuur 6.3 Zand is een bekende vorm van korrelige materie

Inleiding

Als je een bak gemengde noten schudt, komen de grootste noten altijd boven. Een enkele sneeuwbal kan al een sneeuwlavine tot gevolg hebben. Zand in een zandloper gedraagt zich als een vloeistof, maar toch weer niet helemaal. Op een vloeistof kun je immers niet lopen.

Het gedrag van korrelige materie is zeer complex. Granulaire –korrelige– materie gedraagt zich verrassend wanneer het geschonken wordt, zoals in een zandloper of geschud zoals in een doos met balletjes.

Geen gas, geen vloeistof en geen vaste stof. Maar voor industriële processen is ‘granular matter’ na water de meest gemanipuleerde materie. Toepassingen legio, uitdagingen indrukwekkend. Lees erover in bijgaande bronnen.

Opdracht

Je legt je klasgenoten uit wat granulaire materie is. Leg uit waarom het zo bijzonder is. Geef voorbeelden van situaties waarin het gedrag afwijkt van het gedrag van vaste stoffen, vloeistoffen of gassen. Laat een proef zien, een simulatie of een rekenmodel. Maak gebruik van onderstaande bronnen.

Bronnen

 Natuurkunde.nl; Granulaire stoffen

 UTwente; Granular Matter

 UTwente; Dry Quicksand

 Wikipedia; Granular material

 Kennislink; Zandjets

6.5

Hotpads

Inleiding

Moet je alles geloven wat in reclame-uitingen staat? Vast niet. Maar hoe werken die hotpads? Hoe mysterieus is het materiaal dat ervoor gebruikt wordt? Kun je het hergebruiken?

Welke toepassingen van dit spectaculaire principe zijn er? Kun je nog meer mogelijkheden bedenken? Lees erover in bijgaande bronnen.

Opdracht

Je legt je klasgenoten uit wat hotpads zijn. Waardoor zijn ze bijzonder? Waar vind je toepassingen? Welke toepassingen worden voorzien? Leg met behulp van een model uit waarom hotpads bijzonder zijn. Leg de werking uit, hoe komt het dat ze opeens warm worden?

Wat heeft dit met hotpads te maken?

 YouTube; Instant hot ice

Bronnen

 SafetyCentral; Inreushanbod.html

 How stuff works; Heat pads

 Wikipedia; Sodium acetate



"I gave the ThermaBands a try last week on a particularly cold day and was pleasantly surprised to find that they performed as promised. I wore a ThermaBand on my right wrist and nothing on my left. After two hours my left hand was cold and stiff but my right was still comfortable."

6.6

Piëzokristallen

Inleiding

Je hebt vast wel eens gehoord van piëzo-elektriciteit: er bestaan piëzo-elektrische luidsprekers, aanstekers en zogenaamde transducers. Piëzo-elektriciteit is de eigenschap dat bij het vervormen van kristallen een elektrisch veld aan het oppervlak wordt opgewekt. In figuur 6.4 staan drie plaatjes die laten zien hoe zinkatomen (rode bolletjes) en zwavelatomen (geel) geordend zijn in een piëzo-elektrisch zinksulfide kristal. Op de link onderaan de bladzijde staat een internet adres waar je animaties kunt zien van dit kristal. Deze animaties laten zien hoe de zink en zwavel atomen bewegen als je het kristal vervormt door er op te duwen. Je kunt deze animaties gebruiken om piëzo-elektriciteit te verklaren. Piëzo-elektriciteit werkt ook omgekeerd: als je een elektrische spanning op een piëzo-elektrisch kristal brengt, dan gaat het vervormen.

Opdracht

Je legt je klasgenoten uit wat piëzo-elektriciteit is en hoe het verklaard kan worden (hiervoor kun je de genoemde animaties gebruiken). Zoek ook een aantal toepassingen van piëzo-elektriciteit en leg uit hoe ze werken. Misschien kun je zelf een nieuwe toepassing bedenken.

Bronnen

-  [Research Media & Cybernetics; Piezoelectricity](#)
-  [Answers.com; Piezoelectricity](#)
-  [Wikipedia; Piezoelectricity](#)
-  [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Piezokristallen](#)

Figuur 6.4 Dit is wat er gebeurt met de atomen in een piëzoelektrisch kristal als ze worden samengedrukt. Kun je al zien hoe het spanningsverschil wordt veroorzaakt?

Antwoorden op enkele opgaven

Opgave 11 Algemene gaswet

- a) Gascilinder in koud water stoppen.
- b) Gewichten toevoegen.
- c) Gewichten weghalen.
- d) Pin vastzetten zodat V constant blijft en dan gascilinder in koud water zetten

Gebruik $pV=nRT$ om je redeneringen te controleren.

Opgave 20 Algemene gaswet en kinetische energie

- a) Temperatuur is hetzelfde, dan is de gemiddelde kinetische energie per gasmolecuul ook hetzelfde.
- b) Maakt niet uit welk gas het is. Bij dezelfde temperatuur is de gemiddelde kinetische energie per gas molecuul hetzelfde.

Opgave 21 Vergelijken van gassen

- a) $pV=nRT$ p en V zijn gelijk, de massa is gelijk, maar met gelijke massa moeten er veel meer H_2 moleculen zijn dan N_2 . Stel dat de massa 28 g is, dan is dat 1 mol N_2 , maar 14 mol H_2 . Om dus toch dezelfde waarde van pV te bereiken zal de temperatuur van waterstof veel lager moeten zijn dan die van stikstof.
- b) Als de gassen dezelfde temperatuur hebben, dan zal (bij gelijke p en V) ook het aantal mol gas hetzelfde moeten zijn. De massa van de waterstof zal veel kleiner zijn vanwege de kleinere mol massa vergelijken met stikstof.

Opgave 36 Verdamping en condensatie

Nee, je kunt alleen concluderen dat er evenveel verdamping als condensatie was.

Opgave 40 Rails

- a. We zoeken de uitzettingscoëfficiënt van ijzer op in tabel 8 van BINAS:
 $\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Het temperatuurverschil is $\Delta T = 40 - 5 = 35^\circ C$. Invullen van de gegevens geeft de lengte-expansie:
$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 30000 \cdot 35 = 12,3 \text{ mm}$$

Als de treinrails bij $5^\circ C$ 30 meter was is de lengte bij $40^\circ C$: 30,01 m.
- b. Het temperatuurverschil is hetzelfde, dus $\Delta L = 12,3 \text{ mm}$. Ditmaal krimpt de rails. Dus de lengte van de trainrails is 29,99 m.

Opgave 41 Uitzettingscoëfficiënt

Rubber: negatief. Water 0 - 4 graden: negatief, boven 4 graden positief.

Opgave 58 Temperatuurtoename en energie

De soortelijke warmte van water is het grootst, dat betekent dat veel energie nodig is om de temperatuur te laten stijgen. Voor glas is het kleiner, en voor ijzer nog kleiner. Dat betekent dat bij warmteoverdracht van een vaste hoeveelheid energie (de 100 J) de temperatuur van het ijzer het meeste stijgt, die van glas minder, en die van water nog minder.

Opgave 59 Soortelijke warmte

Voor eenzelfde temperatuurstijging van 10 naar $20^\circ C$ is voor water de meeste energie nodig en voor ijzer de minste.

Bijlage A Appletopdrachten

Hoofdstukvragen	Welke fysische eigenschappen van gassen, vloeistoffen en materialen kun je beschrijven en analyseren met behulp van een deeltjesmodel?
-----------------	--

Naast gassen kennen we natuurlijk ook vaste stoffen en vloeistoffen. We gaan na of ons model een aantal eigenschappen van deze fasen kan laten zien.

A.1 Wet van Boyle

Applet:

 [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

[Begininstellingen: weinig deeltjes $N = 20$; $T = 1200$, $p = 50$ geen zwaartekracht]

Wat gebeurt er als een deeltje tegen de beweegbare zuiger botst? Je ziet die zuiger een stukje omhoog gaan. Even later zakt-ie weer totdat er wederom een deeltje tegen de zuiger botst. Helemaal stilstaan doet ie niet, maar gemiddeld blijft die zuiger wel op z'n plaats.

- Wat verwacht je dat er gebeurt als je nu alleen de temperatuur verlaagt? Ga na of je verwachting en het model overeenkomen.
- Wat verwacht je dat er gebeurt als je alleen het aantal deeltjes vergroot? Ga na of je verwachting en het model overeenkomen.

Hoe kun je met het model de wet van Boyle laten zien?

A.2 Algemene gaswet

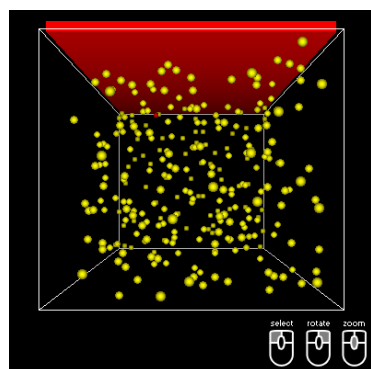
Applet:

 [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

Je wilt met het model laten zien welk verband er bestaat tussen volume, druk en temperatuur bij een constant aantal deeltjes. Welke instellingen moet je gebruiken?

Applet:

 [PhET Interactive Simulations; Gas Properties](#)



Figuur A.1 De applet over het deeltjesmodel.

Pomp wat gasdeeltjes in het afgesloten vat. Wat gebeurt er als je:

- bij constante temperatuur de zuiger indrukt?
- bij constant volume en twee soorten deeltjes 'de zwaartekracht aanzet'?
- bij constante druk de temperatuur verhoogt?
- Ga na welk verband dit model laat zien tussen temperatuur, druk en volume van het afgesloten gas.

A.3 De atmosfeer

Applet:

 [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

[Begininstellingen: $N=700$; $T=1000$ °C, zwaartekracht 500, $p=50$, ✓ bij 'teken deeltjes']

Het gas in een vat wordt onderworpen aan de zwaartekracht.

- Kijk eens wat er gebeurt met de deeltjesdichtheid vlak bij de grond.
- En op grotere hoogte?
- Wat gebeurt er met de verdeling van de deeltjes over de ruimte als je de temperatuur verlaagt?

A.4 Faseovergangen van de elementen

Applet:

 [Lon-Capa; Phase Transition Temperatures](#)

Je ziet het periodiek systeem. In welke fase zijn al die elementen? Je krijgt een beeld door de temperatuur stapsgewijs te verhogen of te verlagen.

- Bij welke temperatuur is stikstof vloeibaar?
- Wanneer gaat ijzer smelten?
- Welk metaal kookt bij de laagste temperatuur?
- Controleer je bevindingen door smelt- en kookpunt ook in Binas op te zoeken.

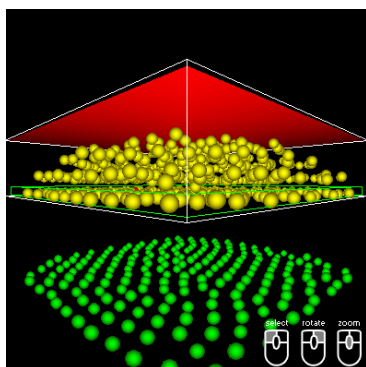
A.5 Afkoelen

Applet:

 [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

Wat gebeurt er als in dit model de temperatuur sterkt verlaagd wordt? Dit vraagt enige rekentijd, dus moet je geduld hebben.

[Begininstellingen: $N=500$; T van 1000- 50 °C reduceren, zwaartekracht 0, $p=50$, ✓ bij 'teken deeltjes']



Figuur A.2 Welke situatie wordt hier getoond? Hoe kun jij die met de applet verkrijgen?

- Beschrijf wat je ziet. Leg een verband met een macroscopisch effect. (druppelvorming en coalescentie)
- Als er een min of meer stabiele toestand is ontstaan vergroot je de zwaartekracht. Beschrijf wat er gebeurt in het model. Vertaal dit naar een waargenomen verschijnsel. (eerst een plasje, vervolgens wordt de hele bodem bedekt met deeltjes)
- Na enige tijd is wederom een stabiele toestand ontstaan. Zet ‘teken doorsnede’ aan door een vinkje in het vakje ervoor te zetten. Welk verschijnsel zie je nu in het model? (kristallisatie, roostervlakken en roosterfouten)
- Soms kun je de ordening wat vergroten door het materiaal even een beetje op te warmen en vervolgens weer af te koelen. (annealing; zoek dit op in [Wikipedia](#))



A.6 Verdampen

Applet:



[NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

We proberen met het model te kijken wat er gebeurt als we de temperatuur van de vaste stof verhogen. Ga uit van de stof in een kristalrooster en verhoog de temperatuur telkens een beetje.

- Beschrijf wat er gebeurt. Leg een verband met verschijnselen rond faseovergangen.
- ‘Boven een vloeistof zal door de verdamping altijd een laagje gas aanwezig zijn.’ Staat er in een natuurkunde tekst. Bij welke instellingen kun je dat in het model zien?
- Laat het model ook zien dat: ‘Naast het ontsnappen van de snellere moleculen uit de vloeistof, zullen er ook moleculen uit de damp weer ‘ingevangen’ kunnen worden in de vloeistof. Op een gegeven moment stelt zich hierbij een evenwicht in: er ontsnappen per seconde evenveel moleculen uit de vloeistof, als er weer ingevangen worden.’

A.7 Extra

Applet:



[NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

Het deeltjesmodel wat we hier gebruiken laat op deeltjesniveau een aantal verschijnselen zien.

- Zijn er verschijnselen in dit hoofdstuk beschreven die je niet met dit model kunt illustreren?
- Kun je nog andere verschijnselen dan de hierboven beschreven illustreren met het model?

Dit model heeft duidelijk ook zijn beperkingen. Bijvoorbeeld doordat het aantal deeltjes gering is.

Bijlage B Practica

Hoofdstukvragen	Wat leert het experiment?
-----------------	---------------------------

Experimenten zijn de basis van de natuurkunde. Ontdek zelf eigenschappen van stoffen en materialen in de volgende practica.

B.1 Grootte van een oliedeeltje

Zet een geheel schone doorzichtige bak met een laagje water erin op de overheadprojector. Blaas voorzichtig krijt (of talk) poeder over het oppervlak, zodat dat met een dun laagje poeder is bedekt.

Los wat oliezuur op in benzine (0,2 % oplossing). Oliezuur lost niet op in water! Laat voorzichtig 1 druppel van het mengsel op het oppervlak vallen. Neem aan dat 1 druppel een volume van 1/50 ml heeft.

- Beschrijf wat er gebeurt.
- Meet de diameter van de vlek aan het begin en na verloop van tijd.
- Verklaar waardoor de vlek niet constant van grootte is.
- Bereken de dikte van de oliezuurlaag.
- Als de oliezuurlaag precies 1 molecuul dik is, kun je op grond van je metingen de grootte van een oliezuur molecuul berekenen.

B.2 Intermoleculaire ruimte

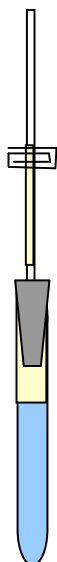
Deel 1

Vul een doorzichtige beker met knikkers.

- Bepaal de diameter van 1 knikker. Doe dit door de lengte van een rij knikkers te meten.
- Bepaal het volume van de beker; dit kun je doen door de hoeveelheid water die de beker kan bevatten te meten.
- Hoeveel knikkers zouden er in de beker passen als er geen ruimte tussen de knikkers zou zijn?
- Tel het aantal knikkers dat in de gevulde beker zit en bereken welk percentage van het bekervolume gevuld is.
- Meet het percentage door water in de gevulde beker te gieten.
- Is het vulpercentage groter als je in de gevulde beker kleine kogeltjes mengt? Hoeveel groter?
- Bereken het maximaal haalbare vulpercentage als je de knikkers zo voordelig mogelijk zou kunnen stapelen.



Figuur B.1 Inter 'moleculaire' ruimte.



Figuur B.2 Water en alcohol.

B.3

Deel 2

Vul een reageerbuisje tot de helft met water en gooi er een paperclip in. Giet er vervolgens heel voorzichtig alcohol bij, tot de buis tot aan de rand gevuld is (er mag best een kop op zitten). Als je het voorzichtig doet, zal de alcohol bovenop het water blijven drijven zonder te mengen.

Druk nu het rietje in het stopje, en vervolgens het stopje met het rietje in het reageerbuisje. Als het goed is stijgt nu de alcohol meteen in het rietje omhoog.

Ruim met een tissue de alcohol op die over het buisje is gestroomd. Schuif nu de andere paperclip op het buisje zodat je kunt zien waar de waterspiegel precies zit op dat moment (als hij niet goed blijft zitten moet je hem even verbuigen).

- Haal nu met het magneetje de paperclip door de vloeistoffen zodat ze mengen en noteer je waarnemingen.
- Verklaar je waarnemingen.

Brownse beweging en vrije weglengte

Deel 1

Meng een druppel Oost-Indische inkt met enkele ml water. Breng een druppeltje van het mengsel tussen twee dekglasjes. Bij een sterke vergroting en goede belichting zie je een typische ongeordende beweging van het koolstofdeeltje: de Brownse beweging.

Deze beweging wordt wel eens vergeleken met de beweging die een tafeltennisballetje tussen door elkaar krioelende mieren maakt.

Deel 2

Gebruik voor dit deel de applet op

 [NiNa lesmateriaal; Stoffen en materialen; Applet](#)

Eén deeltje temidden van veel andere deeltjes, die allemaal bewegen. Je kunt die eenling aanklikken – hij wordt dan rood in plaats van geel- en vervolgens zijn levenswandel eens nader bekijken. Maak je alle buurdeeltjes onzichtbaar. Je ziet dan alleen die ene rooie.

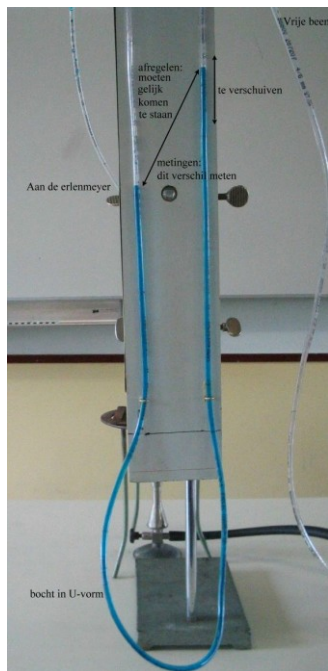
[Begininstellingen: $N=500$; $T=1000$ °C, geen zwaartekracht, $p=0$, ✓ bij 'teken afgelegde weg']

- Waardoor ondergaat het deeltje een richtingverandering? Is de snelheid van het deeltje constant? Is de afstand tussen twee richtingsveranderingen constant? Beschrijf de beweging van het deeltje.

De beweging van het deeltje noem je de Brownse beweging.

De afgelegde weg tussen twee richtingsveranderingen noem je de vrije weglengte.

- Voorspel hoe de vrije weglengte samenhangt met het totaal aantal deeltjes in het vat. Ga na of je voorspelling en het model overeenkomen.



B.4

Gay-Lussac

In 1802 publiceerde de Franse natuur- en scheikundige Joseph Louis Gay-Lussac een artikel waarin hij beschreef hoe druk en volume van de temperatuur afhangen. In dit practicum gaan wij kijken naar het verband tussen druk en temperatuur van een constant volume lucht.

Opstelling

De afgesloten hoeveelheid lucht zit in de erlenmeyer. De temperatuur van de lucht regelen we met een waterbad. De druk meten we met een open vloeistofmanometer (zie figuur B.3).

- Laat de erlenmeyer in het waterbad zakken zonder de stop los te maken. Zorg dat het water niet verder komt dan de hals van de erlenmeyer. Lees de temperatuur van het water, en daarmee ook de temperatuur van de lucht in de erlenmeyer af.
- Het vrije been van de manometer kun je op en neer schuiven. Je moet de slang zo verschuiven, dat het water in beide benen even hoog staat. De druk in de erlenmeyer is dan gelijk aan de buitenluchtdruk.
- Lees op barometer de buitenluchtdruk af.
- Zet (met uitwisbare stift) een streepje op de plank bij het vloeistofniveau in het been dat aan de erlenmeyer vast zit. Tijdens de proef moeten we het vloeistofniveau in dit been telkens op dit niveau instellen (volume constant). Hierbij zal de waterspiegel in het vrije been hoger (of eventueel lager) komen te staan. Het hoogteverschil is een maat voor het drukverschil tussen de lucht in de erlenmeyer en de buitenlucht.
- Tijdens het experiment meet je de temperatuur T van de lucht in de erlenmeyer in graden Celsius en het hoogteverschil Δh tussen de waterniveaus in de beide benen in centimeters meten. Wacht telkens voldoende lang zodat een temperatuur evenwicht is ingesteld. Doe één meting bij 0°C .
- Maak een tabel met vijf kolommen (de laatste drie vul je bij de uitwerkingen in).

Uitwerking

- Maak een grafiek van het hoogteverschil (verticaal) tegen de temperatuur (horizontaal). Teken in je grafiek de 'beste rechte' tussen je meetpunten door. De Schotse natuurkundige William Thomson (de latere Lord Kelvin) nam geen genoegen met dit resultaat: hij wilde de buitenluchtdruk erin betrekken. We gebruiken hiertoe twee kolommen in de tabel: één voor de overdruk en één voor de totale druk (in Pa).
- Teken nu een grafiek van de totale druk p (verticaal) tegen de temperatuur T horizontaal. Begin je temperatuur-as bij ca. -300°C . Teken weer de 'beste rechte' tussen de meetpunten door. Bij welke temperatuur snijdt deze lijn de horizontale as?
- In de laatste kolom van de tabel zet je nu de absolute temperatuur (in Kelvin). Teken een grafiek van de druk p (verticaal) tegen de absolute temperatuur (horizontaal). Trek de 'beste rechte' door je meetpunten. Formuleer je conclusie.

Extra

Thomson herhaalde deze proef met verschillende gassen en met verschillende hoeveelheden gas. Wat hij vond, was opmerkelijk: elke grafiek bleek bij extrapolatie de horizontale as bij dezelfde temperatuur te snijden: -273.15°C . Nog opmerkelijker: als hij de druk constant hield, en het volume tegen de temperatuur uitzette, bleken deze grafieken ook allemaal bij dezelfde temperatuur de horizontale as te snijden.

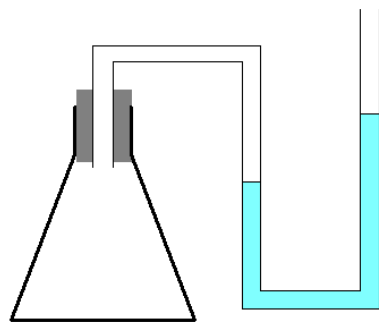
Thomson realiseerde zich dat dit geen toeval kon zijn, en hij gaf deze temperatuur de naam 'het absolute nulpunt'. Verder voerde hij de 'absolute temperatuur' in: de temperatuur is nul bij het absolute nulpunt. Tegenwoordig is dat ook de standaardmethode om temperatuur te meten, met Kelvin als S.I.-eenheid. Hierbij is $0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$.

B.5

Hoogtemeter

Je maakt een waterdruk meter (zie schets in figuur B.4). Je kunt die als hoogtemeter gebruiken.

- Welke andere factoren kunnen je hoogtemeting beïnvloeden? (Geef ook aan hoe de grootte van het vat de meting kan beïnvloeden)
- Hoe hoog moet je klimmen om 1 cm verschil in water niveau te krijgen?
Tip: Bereken de druk van 1 cm waterkolom en de hoogte van een luchtkolom met dezelfde druk.
- Reken dit ook eens uit m.b.v. tabel 30B (nieuwe BINAS) waarbij je de druk tussen 0 m hoogte en 10 km hoogte lineair neemt. Wat valt je op?



Figuur B.4 Schets van een hoogtemeter.

B.6

Uitzetting van een staaf

Een eind van een koperen buis is vastgeklemd; het andere uiteinde rust op de as van een wijzer, die langs een schaalverdeling kan bewegen. De koperen buis wordt nu verhit door de damp van kokend water.

- Ga na welke grootheden je moet meten om uit lengtevermeerdering van de staaf Δl te meten.
- Maak een tabel waarin je de relevante grootheden en hun eenheden vermeldt.
- Bereken uit deze gegevens de lineaire uitzettingscoëfficiënt α .
- Herhaal de metingen voor andere metalen staven.

Bijlage C Procesbeschrijving groepsopdrachten

Hoofdstukvraag	Welke moderne ontwikkelingen zijn er op materiaalgebied?
----------------	--

Doelen

- In korte tijd als klas info verzamelen over het gekozen onderwerp en dit kort en krachtig presenteren aan de groep zodat iedereen na afloop van alle onderwerpen wat af weet.
- Zelfstandig kennismaken met een voor jou nieuw onderwerp uit de natuurkunde en dat diepgaander bestuderen.
- Leren om planmatig te werken en dit te beoordelen voor jezelf en voor je groepsleden (zie bijlage C.1 t/m C.3).

Organisatie

- Je gaat werken in groepen. Van 3 tot 5 leerlingen.
- Voor de opdracht staat 10 slu per leerling: je krijgt 2 contacturen om aan je opdracht te werken en overleg te plegen de rest (8 slu) moet je buiten de lessen om doen.
- Iedere groep organiseert binnen de groep het werk voor ieder individueel groepslid. Van deze organisatie wordt een werkverantwoording opgesteld. (Zie bijlage C.1 t/m C.3)
- Iedere groep kiest een van de genoemde onderwerpen en geeft door aan de docent welk onderwerp dit geworden is.

Werkwijze

Over het gekozen onderwerp wordt onderzoek gedaan op de site (uiteraard mogen ook andere bronnen gebruikt worden, als ze maar vermeld worden).

Eisen

Jullie moeten 2-3 leerdoelen en de uitwerkingen daarvan opstellen waarmee jullie aangeven wat jullie klasgenoten moeten weten na afloop van jullie verhaal.

Let bij het maken op de volgende eindtermen uit het examenprogramma (zie bijlage C.4)

Inhoud

- Er wordt een theoretische verklaring gegeven van de verschijnselen en toepassingen worden beschreven.
- Als er een proef(je) mogelijk is moet dat zeker gedaan worden.
- Maak waar mogelijk gebruik van instructievideo's, applets en animaties.

Wijze van presenteren

- Zorg voor een blad (1 A4) met leerdoelen en uitwerkingen daarvan.
- Idem met een goede uitleg van het onderwerp.
- Bereid een praatje van 7 minuten voor waarin je zoveel mogelijk informatie doorgeeft aan je klasgenoten op hun niveau (bijvoorbeeld een demoproef, een PowerPoint presentatie of een combinatie hiervan).

Beoordeling

Als groep leg je in een logboek je planning vast (Bijlage C.1). Ook let je op een aantal punten die van belang zijn voor het probleem oplossen, samenwerken en het verzamelen en verwerken van informatie (zie bijlage C.2). Waar mogelijk beoordeel je jezelf en enkele andere groepsleden op deze vaardigheden. Ook jullie eigen product beoordeel je als groep (zie bijlage C.3). Deze twee documenten lever je in bij de docent.

C.1 Werkverantwoording proces

Logboek			
Groepsleden:			
Taak	Benodigde tijd	Datum	Wie

C.2 Werkverantwoording algemene vaardigheden

Beoordeling van vaardigheden door jezelf en door groepsleden. 1 = verbeterpunt 2 = gemiddelde 3 = beter dan gemiddeld - = niet van toepassing			
Probleemoplossen			
	Jezelf	Groepslid 1	Groepslid 2
Definieert probleem (formuleert onderzoeksvraag, formuleert helder doel)			
Bekijkt zaken vanuit verschillende invalshoeken (houdt overzicht)			
Ordent en interpreteert feiten			
Maakt haalbare planning			
Bewaakt de planning (houdt zich aan deadlines)			
Samenwerken			
Neemt initiatieven (levert ideeën aan, brengt eigen mening naar voren)			
Geeft opbouwende feedback			
Luistert naar teamgenoten			
Hakt knopen door			
Komt afspraken na			
Neemt verantwoordelijkheid voor groepswerkzaamheden (vervult een evenredig aandeel van de taken)			
Informatievaardigheden			
Maakt effectief gebruik van verschillende infobronnen			
Beschikt over relevante basiskennis			
Selecteert relevante info (stelt relevante vragen, weet welke info ontbreekt)			
Maakt overzichtelijke aantekeningen			
Beoordeelt info op juistheid/Kan herkomst van info vastleggen			
Kan gefragmenteerde info in eigen woorden interpreteren			

C.3 Werkverantwoording resultaat

		Max. punten	Score door groep	Score door docent
Alles serieus ingevuld		1		
Schriftelijk werk				
Leerdoelen	<i>Moeilijkheidsgraad Duidelijkheid Juistheid</i>	3		
Uitwerkingen	<i>Moeilijkheidsgraad Duidelijkheid Juistheid</i>	3		
Uitleg	<i>Moeilijkheidsgraad Duidelijkheid Juistheid</i>	3		
Presentatie				
Omlijsting	Pakkend beginnen, structuur weergeven en duidelijk eindigen	2		
Wijze van presenteren	uit het hoofd, taalgebruik, houding) verstaanbaarheid/correct taalgebruik	2		
Inhoud	Moeilijkheidsgraad Duidelijkheid Juistheid	3		
Hulpmiddelen	Verhelderende en verzorgde hulpmiddelen zoals PowerPoint, video, sheets, practicummateriaal, bordgebruik e.d.	2		
Tijd/Efficiëntie	Veel zeggen in weinig tijd Min 10 max. 15 min per minuut te kort of te lang 1 punt eraf.	1		
	Score	20		