



3 | Warm en koud



Foto op de vorige bladzijde: vloeibaar stikstof

Stikstof is een ongevaarlijke stof die niet giftig en niet brandbaar is. Elke ademteug die je neemt bestaat voor 70% uit stikstof. Stikstof kan vloeibaar worden. Daarvoor moet je het kouder maken dan -196 graden Celsius. Hoe het zit met de verschillende toestanden waarin een stof kan voorkomen leer je in dit hoofdstuk.

3 | Warm en koud | Leerdoelen

§1 Fasen en fase-overgangen

Leerdoel A: Je kunt **fasen** en **faseovergangen** herkennen uit beschrijvingen en afbeeldingen.

§2 Smeltpunt en kookpunt

Leerdoel B: Je kunt m. b. v. het **smeltpunt** en **kookpunt** van een stof bepalen in welke fase een stof zal zijn bij een gegeven temperatuur.

Leerdoel C (EXTRA): Je kunt het **temperatuurverloop** bij het opwarmen van een vaste stof tot een gas beschrijven.

§3 Het deeltjesmodel

Leerdoel D: Je kunt uitleggen wat wordt bedoeld met het **deeltjesmodel** en welke twee eigenschappen dit model heeft.

Leerdoel E: Je kunt deze **verschijnselen verklaren** met het deeltjesmodel: de *fasen(1)*, de *faseovergangen(2)*, *warmte-uitzetting(3)*, *warmtegeleiding(4)*, *diffusie(5)*, *luchtdruk(6)*, *cohesie(7)*, *adhesie(8)*, *oppervlaktetenspanning(9)* en *temperatuurverloop bij faseovergangen(10, alleen als leerdoel C behandeld is)*.

§4 Temperatuur

Leerdoel F: Je kunt omrekenen tussen de **Celsius-schaal** en de **kelvin-schaal** voor temperatuur en je kunt uitleggen wat het **absolute nulpunt** is.

Leerdoel G (EXTRA): Je kunt **rekenen aan het ijken** van thermometers.

§5 Warmte

Leerdoel H: Je weet welke vormen van **warmtetransport** er zijn en je kunt deze herkennen uit beschrijvingen of afbeeldingen.

§6 Luchtdruk

Leerdoel I: Je kunt deze **luchtdrukverschijnselen** verklaren met de concepten **binnendruk** en **buitendruk**: *werking van zuignappen(1)*, *de Maagdenburger halve bollen(2)*, *het opzwellen van een ballon onder een stolp(3)*, *het opzwellen van schuimgebak onder een stolp(4)*, *de noodzaak van een drukpak in de ruimte(5)*.

Leerdoel J: Je kunt **rekenen aan luchtdruk** met deze formule:
$$p = \frac{F}{A}$$



Extra foto: De beroemde geyser “Old Faithful” in Yellowstone National Park (USA).



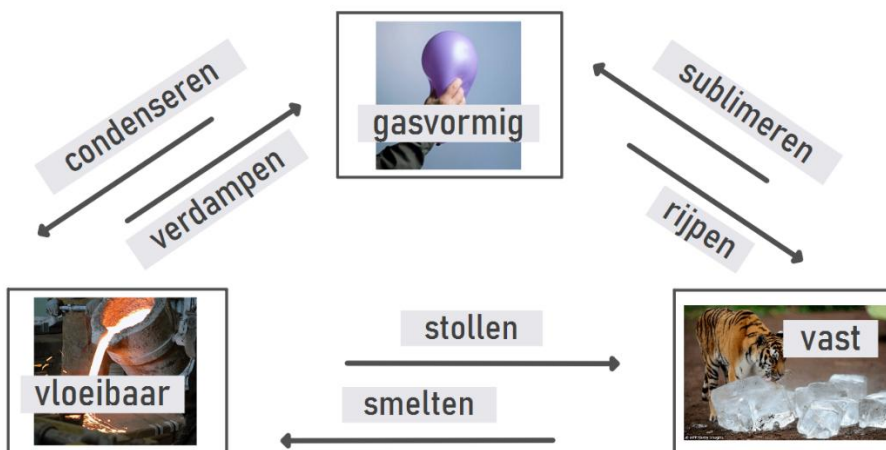
Als je 's winters buiten uitademt zie je wolkjes uit je mond komen. Het water in je adem is gasvormig als het in je longen zit. Als het in contact komt met de koude buitenlucht condenseert het tot een vloeistof en kan het zelfs stollen tot een vaste stof. Wat deze termen betekenen leer je in deze paragraaf.

§1 Fasen en fase-overgangen

Stoffen kunnen in drie vormen voorkomen: **vast**, **vloeibaar** en **gasvormig**. Zo'n verschijningsvorm heet een **fase**. Andere namen zijn **aggregatietoestand** of gewoon **toestand**. Je kunt dus zeggen dat het ijzeren figuurtje van een hond hiernaast in de vaste fase verkeert of in de vaste toestand is. Een ander voorbeeld is het vloeibare water in de plas in de foto eronder. Het helium in de ballonnen onderaan is in de gasfase.



Alle stoffen kunnen van de ene toestand overgaan in een andere. Deze veranderingen heten **faseovergangen**. Het vloeibare water in de plas kan *verdampen* tot een gas, het ijzeren hondje kan door verhitting *gesmolten* worden en als je het helium in de ballonnen koud genoeg maakt kan het *condenseren* tot een vloeistof en zelfs *stollen* tot een vaste stof. De faseovergang *sublimeren* komt voor bij bijvoorbeeld de stof CO₂ die onder normale druk rechtstreeks overgaat van de vaste fase naar de gasvorm. Alle mogelijke fasen en faseovergangen zijn samengevat in dit schema:





Oefenopgaven bij §1

A. Basisopgaven

1. Geef aan in welke fase de dikgedrukte stof of voorwerp is:
 - a. Een blokje **ijzer** ligt voor je op tafel.
 - b. Je ruikt de **benzine** bij een tankstation.
 - c. Het **water** in een emmer is tijdens een winternacht hard geworden.
 - d. Als je hard door dichte **mist** fietst wordt je jas nat.
 - e. Je blaast een ballon op met **lucht** uit je longen.
 - f. Je eet een hardgekookt **ei**.
 - g. Bij het duiken gebruik je een tank met **zuurstof** om adem te halen.
 - h. Je slaat voor de gein een rauw **ei** kapot op het hoofd van je buurman.



2. Bekijk de afbeeldingen hiernaast. Geef voor elke afbeelding aan welke fasen je herkent. Geef een korte toelichting, bijvoorbeeld: "het water in het glas is vloeibaar".

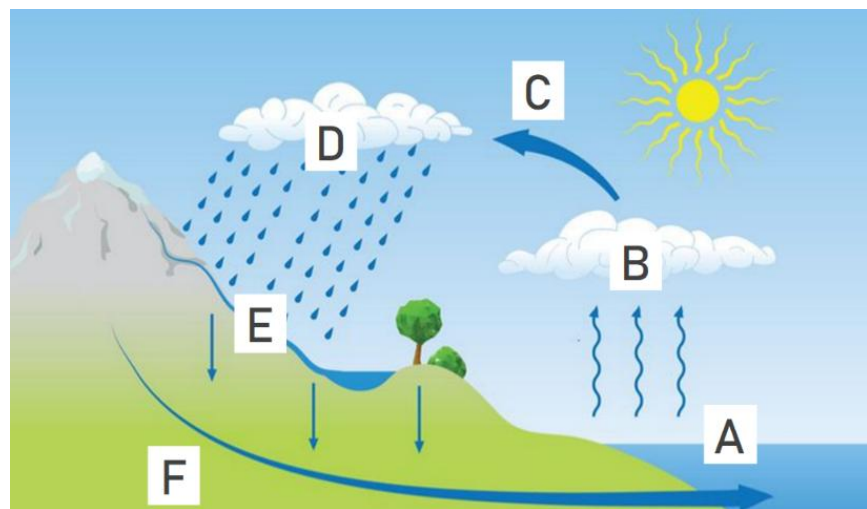


3. Bedenk van welke fase-overgang hier sprake is:
 - a. Een spijkerbroek hangt aan de waslijn te drogen.
 - b. Er ontstaan druppeltjes op je koude drankje.
 - c. Je bakt een ei in de pan.
 - d. Een plas water droogt op.
 - e. De mist klaart in de loop van de ochtend op.
 - f. Je ademt wolkjes op een koude dag.
 - g. Na een koude nacht zijn witte ijskristallen op takken verschenen.



B. Extra oefening

4. Bekijk de afbeelding van de waterkringloop hieronder. Leg uit welke faseovergangen hier voorkomen. Let op: soms komt bij een letter geen fase-overgang voor. Probeer bij die letters toch iets zinnigs te zeggen over wat daar gebeurt met het water.



5. Bekijk de afbeelding hiernaast van een glazen theepot met kokend water er in.

Geef voor elke van de aangegeven plaatsen aan in welke fase het water daar is.

- Onderin, buiten de bellen.
- Onderin, binnen de bellen.
- Bovenin de pot.
- In de tuit en nét daarbuiten.
- 15 cm buiten de tuit.



6. In welke fase is het water in de lucht bij deze weersverschijnselen:

- Regen
- Sneeuw
- Mist
- Hagel
- Rijp
- IJzel
- Heldere zonovergoten dag zonder wolken

C. Uitdagende of verdiepende opgaven

7. Geef bij deze omschrijvingen aan of het om een vaste stof, een vloeistof of een gasvormige stof gaat. Licht je antwoord toe.

- Deze fase heeft een vaste vorm en een vast volume
- Deze fase heeft geen vaste vorm en geen vast volume
- Deze fase heeft een vast volume, maar geen vaste vorm

8. Bekijk de afbeeldingen hieronder. In beide afbeeldingen zijn de takken bedekt met een laagje ijs. Een van deze vormen van ijs noem je rijp, de ander heet ijzel.

- Schrijf op welke afbeelding ijzel laat zien en welke rijp.
- Leg voor beide foto's uit door welke fase-overgang de toestand in die foto ontstaan is.

9. Verklaar de volgende verschijnselen met de woorden vorm en volume.

- In water kun je zwemmen, maar in ijs niet.
- Als een boer mest uitrijdt kun je dat ruiken.
- Blokken hout kun je stapelen.
- Een fles water kun je leegschinken.





Extra foto: In de gewichtloosheid van het *International Space Station* vormt water grote bellen die rondzweven.



Kwik kennen we uit hoofdstuk 1 als een stof met een grote dichtheid ($13,5 \text{ g/cm}^3$). Daarnaast is kwik ook bijzonder vanwege een andere eigenschap: het een van de weinige metalen welk vloeibaar is bij kamertemperatuur ($25 \text{ }^\circ\text{C}$). Kwik stolt pas als de temperatuur onder $-39 \text{ }^\circ\text{C}$ komt. In deze paragraaf leer je meer over zulke grenstemperaturen.

§2 Smeltpunt en kookpunt

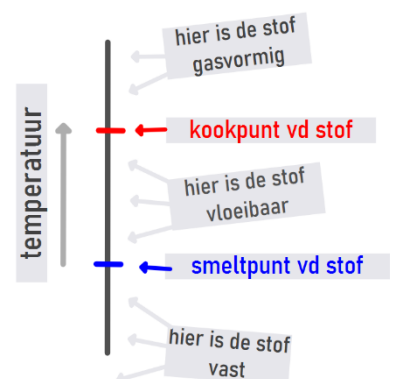
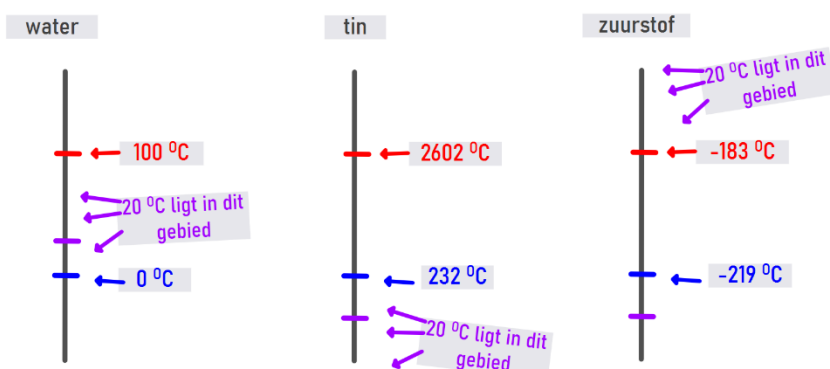
Als je een vaste stof warm genoeg maakt **smelt** deze tot een vloeistof en als je deze vloeistof nog verder doorverwarmt **verdampt** deze tot een gas. De temperaturen waarbij een stof smelt tot een vloeistof of een vloeistof verdampt tot een gas heten respectievelijk het **smeltpunt** en het **kookpunt**. Voor elke stof zijn deze temperaturen anders. Bekijk de tabel hiernaast voor de kookpunten en smeltpunten van een aantal stoffen.

Als je het smeltpunt en het kookpunt van een stof weet kun je voorspellen in welke toestand je de stof bij een bepaalde temperatuur zult aantreffen. Onder het smeltpunt is de stof vast en boven het kookpunt is de stof gasvormig. Tussen deze twee temperaturen in is de stof vloeibaar. Dit is samengevat in het **faseschema** in de figuur rechtsonder. Je kunt voor elke stof zo'n schema opstellen om voor een bepaalde temperatuur de fase te vinden waarin de stof bij die temperatuur zal verkeren.

Voorbeeld: Bepaal in welke fase water, tin en zuurstof zijn bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Uitwerking: Stel schemaatjes op voor elke stof met behulp van de gegevens in de tabel. Je ziet dat $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bij water tussen het smeltpunt en het kookpunt in valt. Water is dus vloeibaar bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Voor tin valt $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ruim onder het smeltpunt, dus tin is in de vaste fase bij deze temperatuur. Het kookpunt van zuurstof is $-183 \text{ }^\circ\text{C}$. De $20 \text{ }^\circ\text{C}$ valt daar heel ruim boven dus zuurstof is gasvormig bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Stof	Smeltpunt ($^\circ\text{C}$)	Kookpunt ($^\circ\text{C}$)
Water	0	100
Alcohol	-114	78
Methaan	-182	-162
Propaan	-188	-42
Buthaan	-138	-1
IJzer	1538	2862
Lood	328	1749
Aluminium	660	2470
Koper	1085	2562
Goud	1064	2700
Wolfram	3422	5556
Tin	232	2602
Kwik	-39	357
Gallium	30	2400
Zuurstof	-219	-183
Stikstof	-210	-196
Helium	-272	-269
Stearinezuur	69	361
Palmitinezuur	63	351



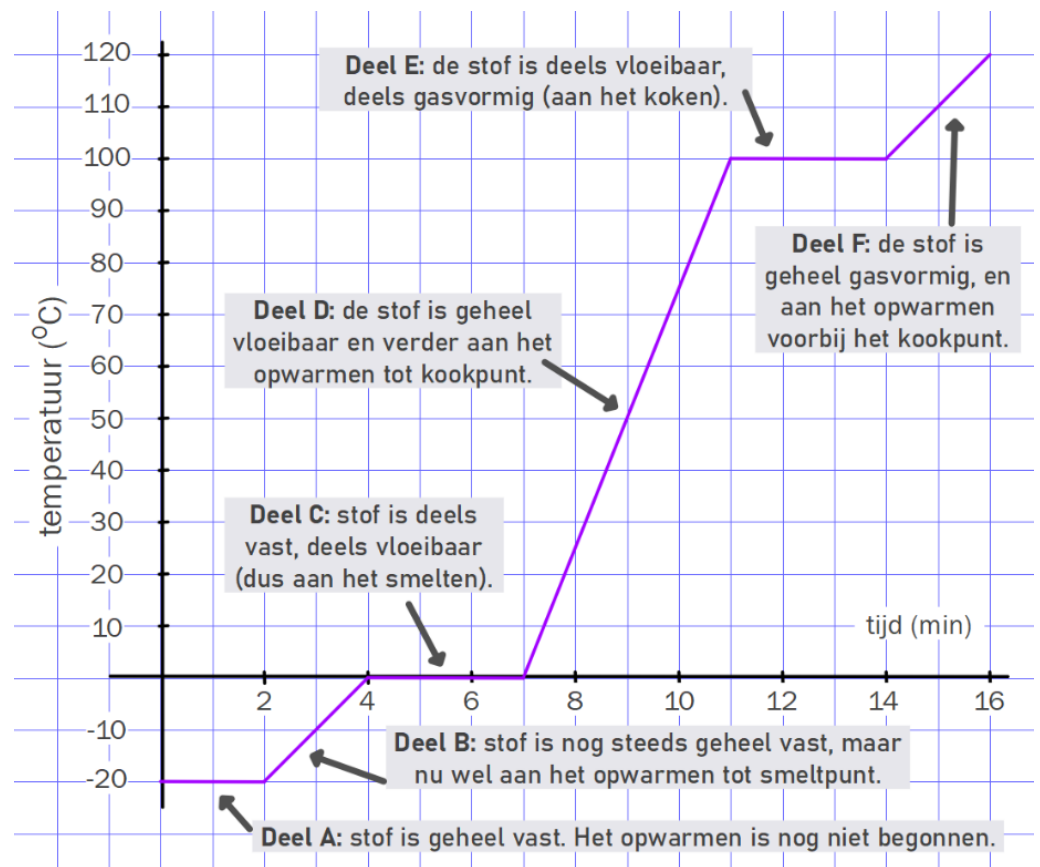
Alleen **zuivere stoffen** zoals ijzer, water, zuurstof en kooldioxide (CO_2) hebben een duidelijk smeltpunt en kookpunt. Sommige mengsels van metalen (genaamd **legeringen**, bijvoorbeeld messing en staal) hebben een **smeltraject**: het smelten begint bij een bepaalde temperatuur, maar zet nog niet echt door. Pas bij een verdere temperatuurstijging smelt het mengsel helemaal.

Een andere categorie zijn de **materialen**. Een **materiaal** is vaak een combinatie van uit meerdere stoffen. Voorbeelden zijn autobenzine, alle houtsoorten en verschillende soorten plastic. Zulke materialen hebben geen smeltpunt maar ondergaan bij verhitting chemische reacties. Hier leer je meer over bij scheikunde.



EXTRA: Temperatuurverloop bij fase-overgangen

Stel: je zet een bekglas met een blokjes ijs in een oven. Het ijs zal eerst smelten tot vloeibaar water. Dit vloeibare water zal verder opwarmen tot het kookt en na verloop van tijd zal al het vloeibare water door het koken overgegaan zijn tot een gas. Het blijkt dat de temperatuur van het water gedurende dit hele proces niet constant toeneemt in de loop van de tijd: zolang het smelten bezig is blijft de temperatuur van het resterende ijs en van het ontstane water 0°C . Pas als al het ijs gesmolten is tot water van 0°C stijgt de temperatuur verder. Iets vergelijkbaars gebeurt als het vloeibare water het kookpunt van 100°C bereikt. Het water begint dan te koken en gaat heftig over in de gasvorm. Het kokende water dat nog resteert blijft op een temperatuur van 100°C hangen totdat het helemaal overgegaan is in de gasvorm. Als dit gasvormig water gevangen blijft in de oven kan het vervolgens verder opwarmen tot hogere temperaturen. Een grafiek van de temperatuur van het water in de tijd ziet er dan als volgt uit:



De reden dat het water tijdens het smelten en het koken niet in temperatuur stijgt vinden we in het deeltjesmodel. Dit wordt uitgelegd in paragraaf 3.

Oefenopgaven bij §2

A. Basisopgaven

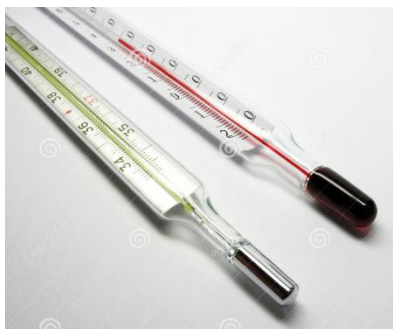
- Hiernaast zie je nog een keer de tabel met smelt- en kookpunten van blz. 8.
 - Bepaal van elk van deze stoffen in welke fase ze zijn bij een temperatuur van 60 °C: water, alcohol, propaan, ijzer, kwik en helium.
 - Bepaal van elk van deze stoffen in welke fase ze zijn bij een temperatuur van 1000 °C: water, ijzer, aluminium, goud, tin, stearinezuur.
 - Bepaal in welke fase deze stoffen zijn bij een temperatuur van -200 °C: water, propaan, kwik, zuurstof en helium.
- Bepaal tussen welke twee temperaturen deze stoffen beide vloeibaar zijn:
 - Lood en ijzer
 - Alcohol en water
 - Methaan en propaan
- Noem drie verschillende tweetallen van stoffen (dus in totaal zes verschillende) die je nooit tegelijkertijd in dezelfde omgeving in dezelfde fase zult aantreffen.
- Welke stoffen ijzer, koper en goud moet je het warmst maken om deze te doen:
 - smelten?
 - verdampen?
- Welke stof heeft het
 - kleinste verschil tussen het smeltpunt en het kookpunt?
 - grootste verschil tussen het smeltpunt en het kookpunt?

Stof	Smeltpunt (°C)	Kookpunt (°C)
Water	0	100
Alcohol	-114	78
Methaan	-182	-162
Propaan	-188	-42
Butaan	-138	-1
Ijzer	1538	2862
Lood	328	1749
Aluminium	660	2470
Koper	1085	2562
Goud	1064	2700
Wolfram	3422	5556
Tin	232	2602
Kwik	-39	357
Gallium	30	2400
Zuurstof	-219	-183
Stikstof	-210	-196
Helium	-272	-269
Stearinezuur	69	361
Palmitinezuur	63	351

B. Extra oefening

- Noem de stoffen uit de tabel die je zonder hulpmiddelen zoals een koelapparaat nooit op aarde in de vaste fase zult aantreffen. Zoek daarvoor eerst op hoe koud het op aarde maximaal kan worden.
- Bedenk welke stoffen uit de tabel je zonder hulpmiddelen zoals een brander nooit op aarde in de gasfase zult aantreffen. Zoek daarvoor eerst op hoe heet het op aarde maximaal kan worden.
- Je hebt een koelapparaat gevuld met lucht. In lucht zitten voornamelijk zuurstof en stikstof. Bij aanvang van je experiment heeft de lucht in het apparaat een temperatuur van 20 °C. Je koelt de lucht in het apparaat langzaam af tot een temperatuur van -230 °C. Tijdens dit experiment kijk je door een raampje bij het koelapparaat naar binnen. Leg uit in welke volgorde je het stikstof en het zuurstof de faseovergangen ziet doorlopen.
- (EXTRA). Schets een temperatuur-tijdgrafiek (zoals in figuur 30) voor een hoeveelheid lood die je in 12 minuten verwarmt van 0 °C tot 2000 °C. Op de verticale as van je grafiek zet je de temperatuur. Laat deze lopen van 0 °C tot 2000 °C over 10 hokjes. Zet de tijd op de horizontale as en kies hier 1 hokje voor een minuut. Schat zelf in hoe lang de verschillende onderdelen van het opwarmen zouden kunnen duren. Denk er om dat je alle verplichte onderdelen van een grafiek toevoegt zoals labels bij de assen.





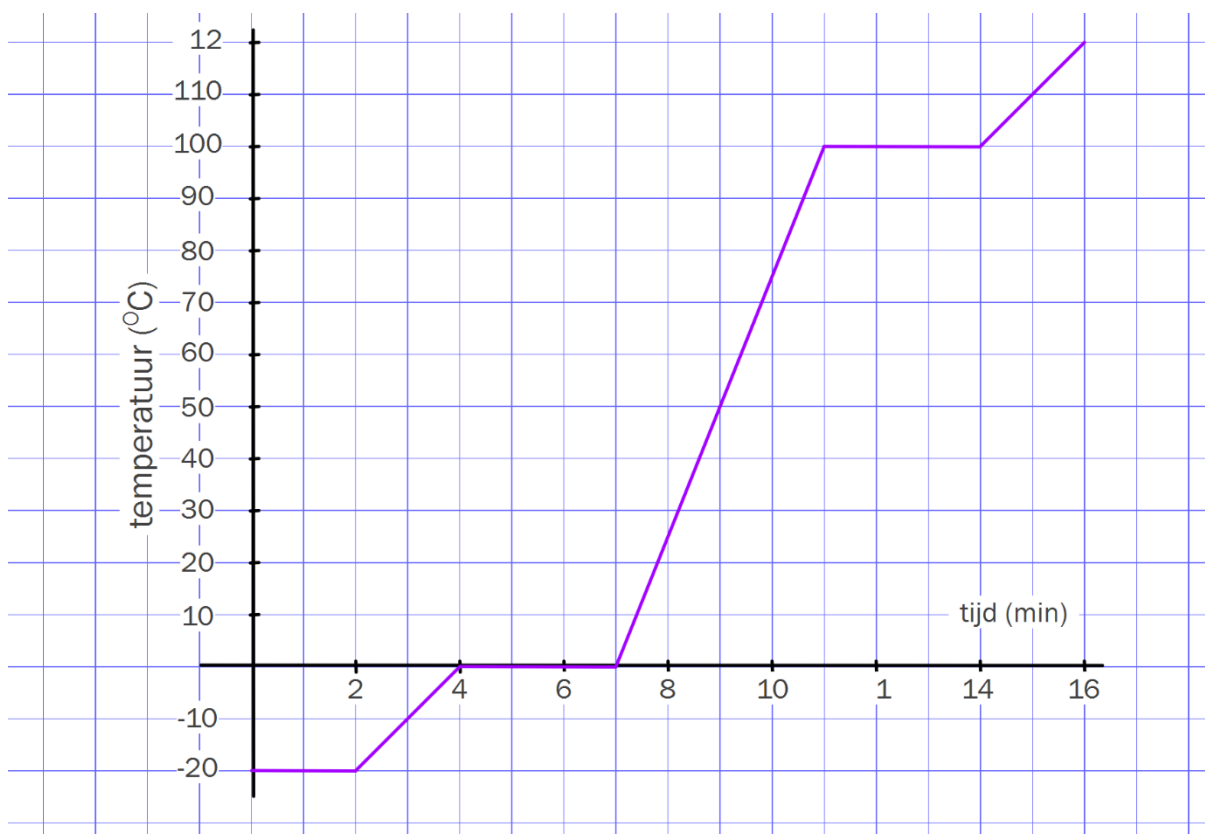
10. In vloeistofthermometers zit een gekleurde stof die vloeibaar moet blijven voor een goede werking van de thermometer. Vroeger zat in zulke thermometers kwik. Tegenwoordig is dat alcohol met een beetje kleurstof. Beantwoord deze vragen:

- Waarom zou kwik nu niet meer gebruikt worden, denk je?
- Leg uit of kwikthermometers gebruikt konden worden in de winter in Siberië.
- Kun je alcohol in een oventhermometer gebruiken? Typische ovens kunnen stoken tot $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

C. Uitdagende of verdiepende opgaven

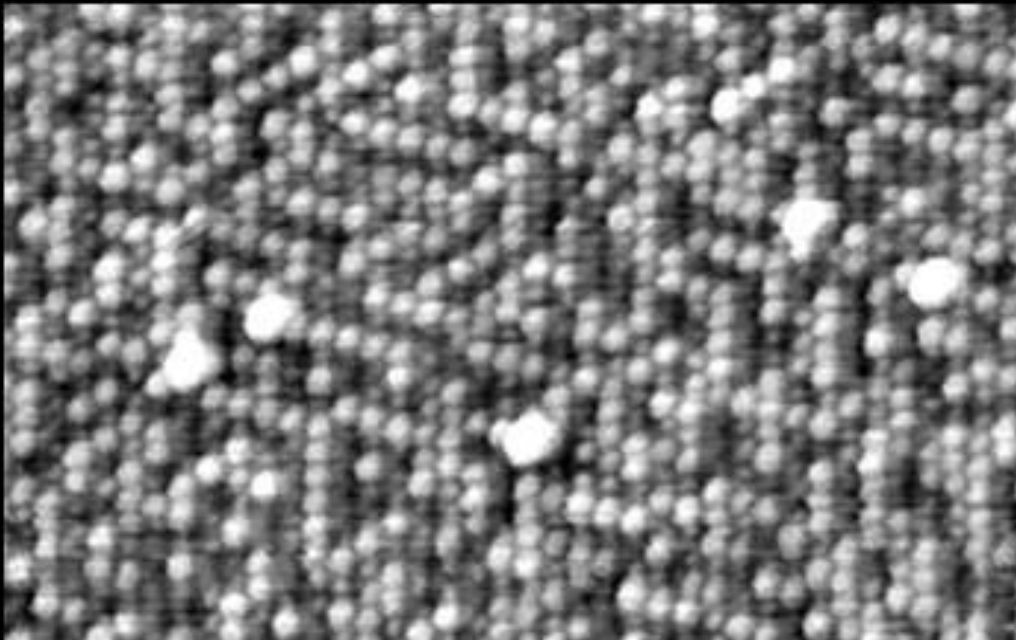
11 (EXTRA). Hieronder zie je opnieuw de grafiek van blz. 9. Teken in dit diagram grafieken die horen bij onderstaande experimenten. Bedenk telkens goed wat wel verandert ten opzichte van de uitgangssituatie en wat niet. Gebruik een potlood en druk niet te hard zodat je nog makkelijk kunt gummen.

- Een waterkoker die het water twee keer zo snel kan verwarmen
- Als je het experiment uitvoert op een hoogte van 3000 m. Het kookpunt van water is daar 90°C . Het smeltpunt verandert niet als je de bergen in gaat.
- Als je een hoeveelheid zout aan het water toevoegt waardoor het smeltpunt verlaagt wordt naar $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Het kookpunt verandert hierbij niet.



12. Zoek op internet op hoe de moleculen van methaan, propaan en buthaan er uit zien en uit hoeveel atomen de moleculen van deze stoffen bestaan. Vergelijk dit aantal vervolgens met de kookpunten van deze stoffen. Wat valt je op?

13. In de winter strooit men zout op bevroren wegen. Het laagje ijs op de weg ("ijzel") smelt daardoor. Is de temperatuur van het gesmolten ijs hoger, gelijk of lager dan nul graden Celsius? Leg uit.



Deze foto van een ijzeren plaatje is gemaakt met een elektronenmicroscop. Door de extreme vergroting kun je de afzonderlijke atomen van het ijzer zien zitten.

§3 Het deeltjesmodel

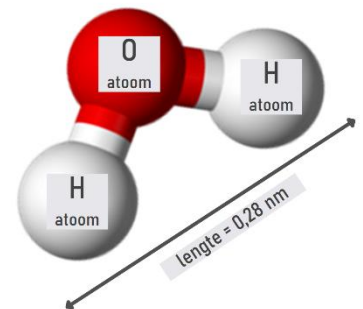
Om gedrag van stoffen zoals smelten en verdampen te begrijpen moeten we op hele kleine schaal kijken naar hoe stoffen opgebouwd zijn. Het blijkt dat stoffen als water bestaan uit deeltjes die **moleculen** worden genoemd. Deze moleculen zijn te klein om onder een microscoop te zien: hun lengte is maar 280 pm (picometer). In een druppel water zitten zo'n 10^{21} watermoleculen. Ondanks dat ze niet te zien zijn onder een microscoop wist men al meer dan 100 jaar geleden uit experimenten af te leiden dat ze bestaan.

Moleculen bestaan op hun beurt weer uit balletjes genaamd **atomen**. In de bovenste afbeelding hiernaast zie dat een watermolecuul bestaat uit twee atomen van het type H en één atoom van het type O. Daarom is de molecuulformule van water "H₂O". Hoe andere moleculen in elkaar zitten leer je bij het vak scheikunde.

Veel natuurkundige verschijnselen zijn te verklaren met het idee dat stoffen uit moleculen bestaan. Stoffen in de **vaste** fase, bijvoorbeeld, zijn hard en hebben een vaste vorm omdat de moleculen van die stof in de vaste fase strak tegen elkaar aanzitten en niet kunnen bewegen ten opzichte van elkaar. Ze trillen alleen een beetje op hun plaats.

Bij een stof in de **vloeibare** fase zitten de moleculen nog wel tegen elkaar aan, maar kunnen ze vrijuit langs elkaar heen glijden. Doordat de moleculen niet meer strak aan elkaar vastzitten neemt het water als geheel moeiteloos een andere vorm aan: in een ronde bak is het water rond, in een vierkante bak is het vierkant.

In een **gas** stuiteren de moleculen helemaal los van elkaar in het rond. Dat verklaart onder meer waarom gassen druk kunnen uitoefenen: de moleculen botsen de hele tijd tegen dingen aan, bijvoorbeeld tegen de binnenwand van een opgeblazen ballon. Omdat de moleculen met zoveel zijn voelen al die botsingen tegen de ballonwand dat als een constante kracht van binnen naar buiten.



Het deeltjesmodel

Om gedrag van stoffen zoals smelten en verdampen te verklaren gebruiken we bij natuurkunde het deeltjesmodel. Dit model gaat er van uit dat alle stoffen uit deeltjes bestaan. Bij veel stoffen (waaronder water) zijn dit moleculen. Deze deeltjes hebben twee eigenschappen:

Eigenschap 1: Als een stof warmer wordt gaan de deeltjes sneller bewegen.

Eigenschap 2: De deeltjes trekken elkaar aan.



Met deze twee eigenschappen kun je allerlei verschijnselen heel simpel verklaren.

Voorbeeld 1: Verklaar het smelten van vaste stoffen als ze verwarmd worden.

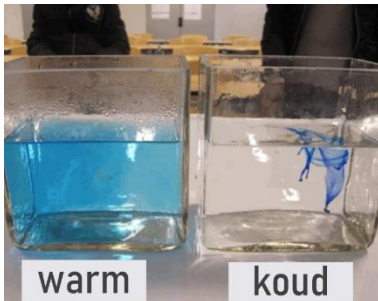
Uitwerking: In een vaste stof zitten de moleculen strak tegen elkaar aan en trillen ze op hun plaats. Door verwarmen gaan ze harder trillen. Als het warm genoeg wordt trillen ze zo hard dat ze elkaar niet meer kunnen vasthouden. De moleculen beginnen langs elkaar heen te glijden. De vaste stof is nu een vloeistof geworden.



Voorbeeld 2: Leg uit hoe een opgeblazen ballon zijn vorm houdt.

Uitwerking: De lucht in de ballon is in de gasfase: de luchtmoleculen stuiteren in het rond. Daar waar de moleculen van binnenuit tegen de ballonwand botsen oefenen ze kort een klein krachtje uit. De krachtjes van alle moleculen bij elkaar die met miljarden tegelijk elke seconde tegen de ballonwand botsen duwen de ballonwand continu naar buiten.

Voorbeeld 3: In warm water wordt kleurstof sneller verspreid dan in koud water. Leg uit hoe dat komt.



Uitwerking: In een vloeistof glijden de moleculen langs elkaar heen en worden zo dus gehusseld. Kleurstof die op één plek in het water wordt gedaan zal daardoor mee gehusseld worden en zich verspreiden. In warm water bewegen de moleculen sneller en gaat dit husselen dus sneller. De kleurstof wordt daarom in warm water sneller verspreid.

Andere verschijnselen en het deeltjesmodel

Er is meer gedrag van stoffen dat te verklaren is met het deeltjesmodel. Enkele voorbeelden:

Uitzetting van stoffen bij opwarmen: als je een vaste stof een opwarmt maar nog wel onder het smeltpunt blijft trillen de moleculen harder op hun plaats en door dit hardere gestuiter duwen ze zichzelf een beetje verder uit elkaar. Ze zitten nog wel vast op hun plaats, maar eisen meer ruimte op. Hierdoor zet het voorwerp waar ze onderdeel van zijn in zijn geheel uit. Denk aan de stalen bruggen in Amsterdam die 's zomers met water gekoeld worden om te voorkomen dat ze door uitzetting vast zouden komen te zitten.

Veerkracht: moleculen trekken elkaar aan en hebben in een vaste stof de neiging om een favoriete positie ten opzichte van andere moleculen in de buurt te hebben. Hierdoor ontstaat een soort vaste structuur. Als door uitrekking een externe kracht deze structuur verstoort "verzetten" de moleculen zich tegen die verstroring. Dit verzetten ervaart je als veerkracht.



Cohesie: de moleculen van een bepaalde stof trekken elkaar aan dus in de vloeibare fase zal water druppels vormen: bolletjes van miljarden moleculen die bij elkaar zitten. Dit samenklonteren noem je cohesie.

Adhesie: moleculen van twee verschillende stoffen trekken elkaar onderling net goed aan als de moleculen van een stof elkaar aantrekken. De meniscus van een wateroppervlak bij glaswerk is hiermee te verklaren: de watermoleculen worden aangetrokken door elkaar (cohesie) maar ook door de moleculen van het glas (adhesie). Hierdoor kruipt het water aan de rand van het oppervlak een beetje omhoog. Dit omhoog kruipen heeft een eigen naam: *capillaire werking*.

Diffusie: de moleculen van een stof in de gasfase kunnen vrij rondvliegen in de ruimte die ze hebben, bijvoorbeeld een heel klaslokaal. Als je in de ene hoek van het lokaal een sterke scheidt laat ruik je dat even later op andere plekken in het lokaal ook. De gassen in je scheidt hebben zich door het rond stuiteren verder verspreid door het lokaal. Deze verspreiding heet diffusie en gebeurt ook in vloeistoffen.



Oefenopgaven bij §3

A. Basisopgaven

1. Hieronder vind je een tabel met kenmerken van moleculen in stoffen. Geef per regel met een kruisje aan bij welke fase een kenmerk hoort. In sommige regels kunnen meerdere kruisjes komen.

de moleculen...	vaste stof	vloeistof	gas
trillen op hun plaats			
bewegen sneller bij hoge temperatuur			
bewegen dicht langs elkaar			
bewegen ver van elkaar			
trekken elkaar nauwelijks aan			
trekken elkaar aan			

2. Geef de namen van deze fase-overgangen die bij de pijlen horen.



3. Verklaar deze verschijnselen met je kennis van moleculen. Geef antwoord in complete zinnen.

- Een gas kun je met samenpersen. Een vloeistof niet.
- Ijs smelt als het wordt verwarmd met een straalkachel
- Een half opgeblazen heliumballon zwelt verder op als de lucht er in wordt verwarmd met een brander (zie foto rechts).
- Op een koud glas limonade ontstaan waterdruppeltjes aan de buitenkant.
- Een plas water verdampt in de loop van de dag, ook al is de temperatuur van die dag ruim beneden het kookpunt van water.
- Vaste stoffen hebben een iets grotere dichtheid dan vloeistoffen van dezelfde stof.



B. Extra oefening

4. Geef aan of deze stellingen juist of onjuist zijn.
- Molculen zitten het dichtst bij elkaar in de vaste fase.
 - Er bestaan verschillende soorten watermoleculen.
 - Sommige stoffen bestaan uit dezelfde moleculen als andere stoffen.
 - In de gasfase bewegen moleculen het snelst.
 - Tussen de moleculen in de vaste fase zit een beetje lucht.
 - Tussen de moleculen van een zuiver gas zit vacuüm.
 - Moleculen zijn opgebouwd uit atomen.
 - Moleculen veranderen van vorm bij fase-overgangen.
 - In een molecuul kooldioxide (CO_2) zitten twee atomen van het type O.
 - Een molculuul methaan (CH_4) bestaat uit vier atomen in totaal.
 - De bellen in kokend water bestaan uit lucht.
 - De bellen in een bubbelbad bestaan uit lucht.
5. Benoem de fase-overgangen die bij deze pijlen horen:



6. Verklaar deze verschijnselen met het deeltjesmodel:

- Kleurstof verspreidt zich in het warme water sneller dan in het koude water.
- Het kost kracht om een stevig opgepompte fietsband in te drukken.
- Als je een scheet laat in een lift ruikt al snel iedereen hem.
- Treinrails kunnen door uitzetting kromtrekken als het heel warm is.

C. Uitdagende of verdiepende opgaven

7. Bekijk de foto van de gekleurde *handboiler* linksonder. Dit experimentje bestaat uit twee bolletjes die verbonden zijn met een buisje. Het geheel is van glas gemaakt, is luchtdicht en is gevuld met een gekleurde vloeistof. Als je de bolletjes op gelijke hoogte houdt loopt het buisje horizontaal. Als je vervolgens een van de bolletjes in je hand houdt loopt alle vloeistof dat bolletje uit naar het andere bolletje toe. Leg uit waarom dit gebeurt.

8. In de afbeelding rechtsonder zie je het drinkvogeltje. Dit is een klassieke natuurkundige demonstratie. Zoek uit hoe dit vogeltje werkt.

- Tip 1: je kunt daarbij voortborduren op je antwoord bij opgave 7.
- Tip 2: doordat het kopje van de vogel continu nat is koelt het af t.o.v. de rest van de vogel.





Een van de warmste plekken op aarde is Death Valley, waar temperaturen kunnen optreden van boven de 50 °C. Ook op andere plekken op aarde kan het zo warm worden. De hoogste temperatuur ooit op aarde officieel gemeten is 56,7 °C.

§4 Temperatuur

Hoe warm of koud een hoeveelheid stof of een voorwerp is druk je uit in de temperatuur. **Temperatuur** is een grootheid met als eenheid de **graad Celsius** (°C). Enkele interessante temperaturen zijn te zien in het lijstje hiernaast. We zagen in §3 dat de moleculen waar een stof als water uit bestaat harder gaan bewegen als de stof opgewarmd wordt. Temperatuur is dus eigenlijk een maat voor hoe hard de moleculen van een stof bewegen.

Het absolute nulpunt

Er bestaat geen maximumtemperatuur in het universum, maar er blijkt wel een minimumtemperatuur te zijn: kouder dan -273 °C kan het in het heelal niet worden. Bij die temperatuur staan atomen en moleculen compleet stil. Deze temperatuur wordt het **absolute nulpunt** genoemd. De kelvin-temperatuurschaal is op dit absolute nulpunt gebaseerd.

Temperatuurschalen

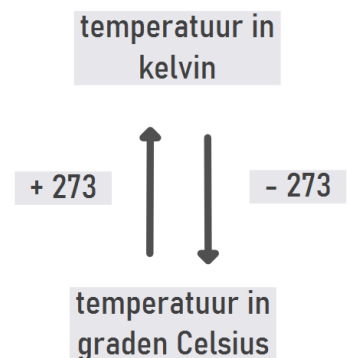
De temperatuurschaal die in de meeste landen wordt gebruik is de **Celsius-schaal**. Deze schaal heeft als nulpunt het smeltpunt van water en als honderdpunt het kookpunt van water.

De wetenschappelijke manier om temperaturen te rapporteren is in de eenheid **kelvin**. De kelvin-schaal heeft het absolute nulpunt als nulpunt en heeft dus alleen positieve waarden. Een stapje op de kelvinschaal is even groot als op de Celsius-schaal. Het smeltpunt van water (0 °C) is dus 273 K en het kookpunt van water (100 °C) is 373 K. Omrekenen tussen graden Celsius en kelvin kun je met het schemaatje hier rechts dat je makkelijk uit je hoofd kunt leren.

Voorbeeld: Reken om naar de kelvinschaal: a) 18 °C b) 0 °C c) -78 °C en reken om naar de Celsius-schaal: d) 1450 K e) 35 K f) 298 K

Uitwerking: Gebruik het schema. Antwoorden: a) 291 K b) 273 K c) 195 K d) 1177 °C e) -238 °C f) 25 °C.

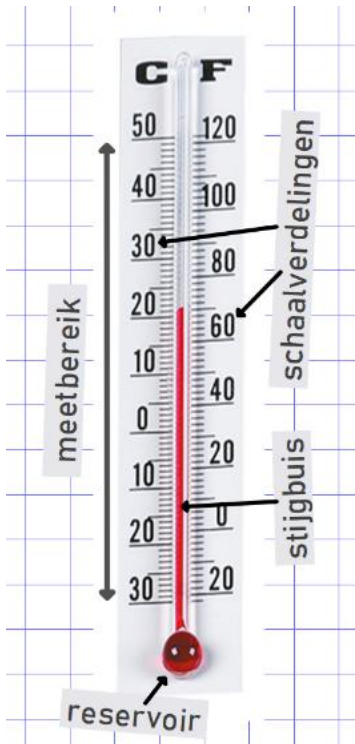
Plaats of situatie	Temperatuur (°C)
Hoogste temp in NL ooit gemeten	40,7
Laagste temp in NL ooit gemeten	-27,4
Oppervlak vd zon	6000
Kern vd zon	15×10^6
Mars overdag	20
Mars 's nachts	-73
Mercurius, overdag	427
Mercurius, 's nachts	-173
Pluto, overdag	-219
Pluto, 's nachts	-239
Koelkast	4
Absolute nulpunt	-273,15
Menselijk	36,5 - 37,5



IJken van een thermometer

Een vloeistofthermometer bestaat uit een glazen bolletje met vloeistof (het *reservoir*) en een stijgbuis. Doordat de vloeistof uitzet als deze warm wordt stijgt het vloeistofniveau in de buis want de vloeistof kan maar één kant op uitzetten. Afhankelijk van de grootte van het reservoir en de diameter van de stijgbuis zal de vloeistof bij een graad temperatuurstijging meer of minder stijgen. Dat is voor elke thermometer verschillend. Als je zelf een thermometer zou maken zou je deze dus eerst zelf moeten voorzien van een schaalverdeling. Dit voorzien van een schaalverdeling heet **ijken**. Dit doe je voor de Celsius-schaal in deze drie stappen:

1. Eerst dompel je de buis in een bak met **smeltend ijs**. De vloeistof in de stijgbuis zal tot een bepaalde hoogte komen te staan. Je zet hier een streepje bij de buis en noemt dit "0 °C".
2. Vervolgens dompel je de buis in een bak **kokend water** en kijk je tot welk niveau de vloeistof in de buis nu stijgt. Bij dit niveau zet je ook een streepje en je noemt dit "100 °C".
3. De afstand tussen deze twee streepjes **verdeel** je in **100 stapjes**. Je kunt nu temperaturen meten met je geijkte thermometer.



EXTRA: Rekenen aan het ijken van thermometers

Als je van een thermometer weet wat de afstand (in centimeter) tussen het 0 °C-streepje en het 100 °C-streepje is, kun je uitrekenen hoeveel centimeter de vloeistof in de thermometer stijgt bij 1 graad Celsius temperatuurstijging. Andersom kun je uitrekenen hoeveel warmer het moet worden om de vloeistof 1 cm te laten stijgen in de thermometer. Bij dit soort rekenwerk is het handig om eerst een overzicht uit te rekenen zoals hieronder voorgedaan.

Voorbeeld 1: Je hebt het 0 °C-streepje en het 100 °C-streepje van een nieuwe thermometer gevonden. Deze streepjes blijken 5 cm uit elkaar te liggen.

- a. Reken uit welke temperatuur de thermometer aangeeft als de vloeistof in de thermometer stijgt tot 2,8 cm boven het 0 °C-streepje.
- b. Reken uit hoe hoog boven het 0 °C-streepje de vloeistof stijgt bij een temperatuur van 93 °C.

Uitwerking: Stel eerst een overzicht op:

$$100 \text{ graden} \leftrightarrow 5,0 \text{ cm}$$

$$1 \text{ graad} \leftrightarrow 0,05 \text{ cm}$$

$$20 \text{ graden} \leftrightarrow 1,0 \text{ cm}$$

Gebruik deze waarden vervolgens om de gevraagde waarden uit te rekenen:

$$a. 2,8 \times 20 \text{ graden} = 56 \text{ °C}$$

$$b. 93 \times 0,05 \text{ cm} = 4,65 \text{ cm}$$

Voorbeeld 2: Bij een andere thermometer die een smallere stijgbuis heeft liggen het 0 °C-streepje en het 100 °C-streepje 21,8 cm uit elkaar.

- a. Reken uit welke temperatuur de thermometer aangeeft als de vloeistof 4,1 cm boven het nulpunt staat
- b. Reken uit hoe hoog de vloeistof stijgt tot boven het 0 °C-streepje als de thermometer een waarde aangeeft van 67 °C.

Uitwerking: Stel eerst een overzicht op:

$$100 \text{ graden} \leftrightarrow 21,8 \text{ cm}$$

$$1 \text{ graad} \leftrightarrow 0,218 \text{ cm}$$

$$4,59 \text{ graad} \leftrightarrow 1,0 \text{ cm}$$

Gebruik deze waarden vervolgens om de gevraagde waarden uit te rekenen:

$$a. 4,1 \times 4,59 = 18,8 \text{ °C}$$

$$b. 67 \times 0,218 = 14,6 \text{ cm}$$

Let op: je mag zulke rekenopgaven ook op je eigen manier oplossen, als je maar een berekening opschrijft.

Oefenopgaven bij §4

A. Basisopgaven

1. Zoek van elk van deze temperatuurschalen op wat op die schaal het smeltpunt en kookpunt van water zijn. Bedenk ook hoeveel graden er tussen die twee temperaturen zitten.

a. Celsius b. Kelvin c. Fahrenheit d. Rankine

2. Reken deze waarden om van de Celsiuschaal naar de kelvinschaal of andersom:

a) 80 °C b) 89 K c) 4 °C d) 12 K
e) 4950 °C f) 300 K g) 166 °C h) 1200 K

3. Een practicumthermometer van school heeft een bereik van tussen de -20 °C en 110 °C. Een koortsthermometer (zie afbeelding rechtsboven) heeft maar een meetbereik van 35 °C tot 42 °C. De koortsthermometer is wel nauwkeuriger.

- Stel, beide thermometers geven temperaturen aan die 0,5 °C te laag zijn. Leg uit bij welke thermometer dat het kwalijkst is en waarom.
- Welke van deze twee thermometers kun je veilig schoonmaken met heet water van 60 °C? Wat gebeurt er met die andere thermometer als je heet water gebruikt?
- Kun je de thermometers veilig schoonmaken met koud water? Leg uit.



4. De oventhermometer in middelste foto rechts werkt niet met een vloeistof die kan uitzetten en krimpen maar met een ander mechanisme. Bekijk de tabel met smelt- en kookpunten in de vorige paragraaf. Zou je een vloeistofthermometer met hetzelfde bereik als deze oventhermometer kunnen maken? Welke stof zou je dan kunnen gebruiken? Leg uit.



5. In de afbeelding hiernaast zie je de thermometer die elke auto op het dashboard heeft zitten. Deze geeft de temperatuur van de motor aan. De motor wordt warm als deze draait en om oververhitting te voorkomen wordt deze gekoeld met koelvloeistof. De motor loopt het soepelst bij een specifieke temperatuur. Te koud of te warm is niet goed. De thermometer op het dashboard geeft geen temperaturen aan. De C staat voor *cold* en de H staat voor *hot*. Leg uit waarom deze schaalverdeling goed genoeg is voor deze thermometer.



6 (EXTRA). Stel je hebt een nieuwe thermometer laten maken door een glasbewerker en je wilt deze thermometer ijken naar de Celsiuschaal. Je stelt vast dat de afstand tussen het 0 °C -streepje en het 100 °C-streepje 20 cm is. Reken uit:

- De afstand op de thermometer die tussen twee gradenstreepjes zou moeten zitten.
- Hoeveel temperatuurstijging nodig is om de vloeistof in de thermometer 1,0 cm te laten stijgen in de stijgbuis.
- Hoe hoog de vloeistof staat in de stijgbuis staat boven het 0 °C -punt als de temperatuur 30 °C is.
- Hoe warm het moet zijn om de vloeistof in de stijgbuis tot 16 cm boven het 0 °C -punt te laten stijgen.
- Hoe ver onder het 0 °C-punt de vloeistof zal zakken als je de thermometer in het vriesvak legt waar een temperatuur van -12 °C heerst.

B. Extra oefening

7. Beredeneer of het nulpunt en het honderdpunt op een thermometer verder uit elkaar of dicht bij elkaar komen te liggen als je:

- De stijgbuis van de thermometer breder maakt.
- Het reservoir van de thermometer groter maakt zodat er meer vloeistof in past.
- De stijgbuis langer maakt.
- Een andere vloeistof gebruikt die meer uitzet per graad temperatuurstijging

8 (EXTRA). Van een thermometer heb je bepaald welke afstand er tussen het 0 °C-streepje en het 100 °C-streepje zit. Dit is 12,4 cm. Reken uit welke stijging van de vloeistof boven het nulpunt op de schaalverdeling hoort bij temperaturen van:

- a) 25,0 °C b) 46,8 °C c) 96,1 °C d) -10 °C

9. (EXTRA) Het blijkt dat er 17,6 cm zit tussen het nulpunt en het honderdpunt van een thermometer. Bereken welke temperatuur het is als de vloeistof in de stijgbuis stijgt boven het nulpunt tot een afstand van:

- a) 3,8 cm b) 19,0 cm c) 11,1 cm d) 0,5 cm

C. Uitdagende of verdiepende opgaven

9. Omrekenen van een temperatuur in Fahrenheit naar de Celsiusschaal kun je doen door van de waarde in Fahrenheit eerst het getal 32 af te trekken en de uitkomst daarvan te vermenigvuldigen met 5 en dan te delen door 9. Je zou dit in een formule kunnen opschrijven als:

$$T_C = (T_F - 32) * 5/9.$$

Hierin is T_C de temperatuur in graden Celsius en T_F is de temperatuur in graden Fahrenheit.

- Gebruik de formule om deze temperaturen om te rekenen naar graden Fahrenheit of andersom.
 - 100 °F
 - 0 °C
 - 0 °F
 - 12 °C
- Bedenk hoe je andersom een temperatuur in graden Celsius zou kunnen omrekenen naar Fahrenheit en hoe je dit in een formule zou kunnen vatten.

10. Je hebt een nieuwe thermometer zonder schaalverdeling er op. Om deze te ijken plaats je de thermometer in je woonkamer waarvan je weet dat de temperatuur daar 20 °C is. Je zet een streepje bij de plek tot waar de vloeistof stijgt. Daarna plaats je de thermometer onder je tong. Je weet dat de temperatuur daar 36 °C is. Je zet opnieuw een streepje bij het vloeistofniveau. De twee streepjes die je nu gezet hebt liggen 1,6 cm uit elkaar.

Reken uit tot hoe hoog de vloeistof zou dalen tot onder het onderste streepje als je de thermometer in de koelkast legt waar het 7,0 °C is.



Op deze infraroodfoto is te zien dat de koffie in de beker een temperatuur heeft van 80 °C. De koffie koelt op drie verschillende manieren af: door stroming, door geleiding en door straling. In deze paragraaf leer je over deze drie vormen van warmtetransport.

§5 Warmte

Energie kan in verschillende vormen voorkomen. De belangrijkste energievormen zijn:

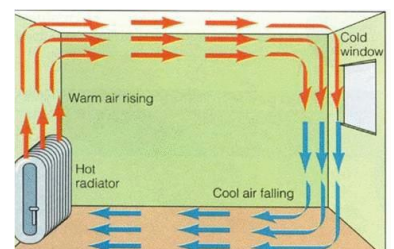
1. beweging van een voorwerp of persoon (bewegingsenergie)
2. als een voorwerp zich op een hoogte bevindt (hoogte-energie)
3. als een veer of elastiek strak gespannen is (elastische energie)
4. opgeslagen in brandstof zoals benzine of voedsel (chemische energie)
5. in de vorm van stroom uit bijv. het stopcontact (elektrische energie)
6. in de vorm van licht (stralingsenergie)
7. in een warm voorwerp (inwendige energie)
8. opgeslagen in atoomkernen (kernenergie)

Warmte (9) is een speciale vorm van energie die zich *aan het verplaatsen is*. Je kunt bijvoorbeeld zeggen dat een pan water op het fornuis warmte opneemt uit het vuur en hete koffie is juist bezig warmte af te staan aan de omgeving. Hieronder wordt uitgelegd op welke drie manieren warmte zich kan verplaatsen.

Warmtetransport

Warme lucht stijgt op. Dit voel je als je je handen boven een kachel houdt. De warme lucht verplaatst zich en neemt de energie met zich mee. Deze vorm van warmtetransport heet **stroming**. Een ander voorbeeld is een föhn: de lucht wordt in de föhn opgewarmd en deze wordt vervolgens verplaatst naar je natte haar.

Als de lucht opgesloten zit in bijvoorbeeld een kamer kan een *convectiestroom* ontstaan (zie afbeelding hiernaast): de warme lucht koelt in een ander deel van de kamer een beetje af daalt daardoor weer naar beneden. Ook vloeistoffen kunnen door stroming warmte verplaatsen. Vaste stoffen niet.





Voorwerpen kunnen warmte ook door zichzelf heen verplaatsen. Dit wordt **geleiding** genoemd. Een voorbeeld van geleiding is wanneer je de metalen steel van een pan op het fornuis aanraakt. Deze is heet geworden doordat de warmte van het vuur door het metaal wordt doorgegeven naar de steel. Geleiding ontstaat doordat de moleculen in het verwarmde deel van de pan harder en harder gaan trillen en deze hardere trilling ook doorgeven aan de moleculen in het nog koude deel van de pan. Vloeistoffen kunnen ook geleiden en gassen ook.



Tenslotte kan een voorwerp warmte verliezen of opnemen door **straling**. Hierbij wordt de inwendige energie van een voorwerp omgezet in infraroodstraling. Deze straling wordt weer omgezet in inwendige energie als deze tegen een voorwerp aankomt. Een voorbeeld zie je hiernaast: de straalkachel zet de inwendige energie van de hete onderdelen om in infraroodstraling. Deze straling verplaatst zich door de woonkamer en komt tegen de hond aan. De vacht en de huid van de hond zetten de infraroodstraling weer om in inwendige energie. De hond heeft het hierdoor lekker warm.

Alle voorwerpen die warmer zijn dan hun omgeving verliezen constant warmte aan de omgeving door straling. Dit geldt net zo goed voor jou als persoon als voor een kopje hete koffie.

Infraroodstraling kun je niet zien met je ogen maar wel met een zogenaamde warmtebeeldcamera (zie foto bovenaan de vorige bladzijde).

Isolatie

Warmtetransport kun je tegengaan met behulp van isolatie. Voorbeelden:

- Op een koude winterdag probeer je je voeten warm te houden met dikke sokken. Hiermee ga je geleiding tegen. De warmte wordt door de extra laag minder goed van je voeten naar de koude grond geleid.
- Je doet een sjaal om zodat de lucht niet direct langs je hals waait en zo warmte afvoert door stroming.
- Door straling verlies je via je hoofd veel warmte per minuut aan de omgeving. Daarom zet je een muts op. Deze absorbeert de meeste straling en wordt daardoor zelf warm waardoor je hoofd ook warm blijft.

Oefenopgaven bij §5

A. Basisopgaven

1. Noem bij elke van deze beschrijvingen een vorm van warmtetransport:
 - a. Een metalen bankje buiten voelt koud als je er 's winters op gaat zitten.
 - b. Op een zonnige dag krijg je het snel warm in een zwart t-shirt in de zon.
 - c. Je zet twee ramen tegen elkaar open in de warme kamer en dankzij de wind koelt het binnen nu snel af.
 - d. Je voelt de warmte als je je hand dicht bij een kop hete thee houdt zonder het aan te raken.
 - e. Je smelt het ijs op de voorruit van je auto door de verwarming in de auto op de hoogste stand te zetten.
 - f. Je verwarmt je garage met een elektrische ventilatorkachel.

2. Bekijk de drie bovenste foto's hiernaast. Benoem bij elke foto welke vorm van warmtetransport daar plaatsvindt of heeft plaatsgevonden. Tip: in de tweede foto van boven zie je een zwarte rubber zak waar je overdag's water in kunt verwarmen in de zon.

3. In de vierde foto van boven zie je het stuur van een fiets. Stel: de fiets heeft de hele nacht buitengestaan. Het plastic handvat heeft dan dezelfde temperatuur als het ijzeren stuur. Toch voelt het stuur kouder dan het handvat. Leg uit waarom.

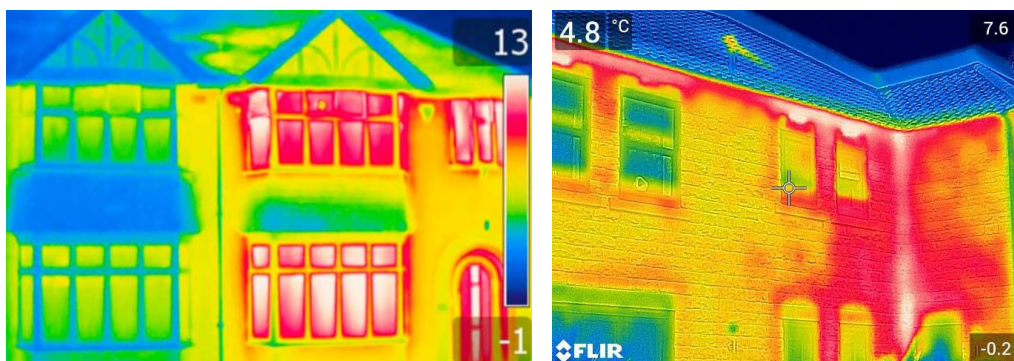
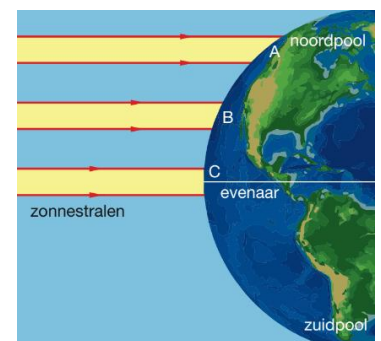
4. Hieronder staan een aantal manieren om warmtetransport tegen te gaan. Noem bij elke manier welke vorm van warmtetransport daarmee belemmerd wordt.

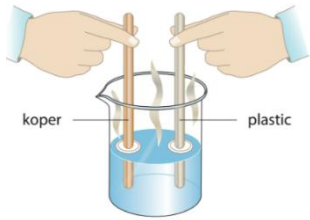
- a. Glimmend folie tussen de radiator en de muur aanbrengen.
- b. Op een zonnige dag lichtgekleurde kleding dragen.
- c. Tochtstrips tussen de deur en de vloer plaatsen.
- d. Dubbele beglazing aanbrengen in de ramen.
- e. Een dikke jas aantrekken.
- f. Het raam dichtdoen.

5. Bekijk de schematische afbeelding hiernaast. De zon beschijnt de hele aarde, maar hier zijn alleen een paar delen (A, B en C) van de totale zonnebundel getekend. Leg uit waardoor het kouder is op de polen dan bij de evenaar.

6. Je kunt een infraroodfoto maken van je huis om te kijken op welke plekken je huis aan de buitenkant het warmst is. Dit zijn de plekken die je beter zou kunnen isoleren om 's winters energie te besparen. Bekijk de foto's hieronder.

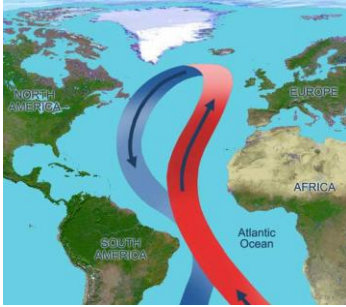
- a. Foto linksonder: welk huis heeft waarschijnlijke dubbele beglazing: het linker of het rechter?
- b. Foto rechtsonder: welk deel van dit huis heeft betere muurisolatie nodig?





B. Extra oefenen

- Noem van elke van deze beschrijvingen de vorm van warmtetransport:
 - Je brandt bijna je vingers als je deze in een hete kop thee doopt.
 - Sneeuw smelt als je deze in je hand houdt.
 - De verwarming zit aan de andere kant van het lokaal, toch heb jij het ook behaaglijk warm tijdens de les in de winter.
 - Achter glas wordt je niet bruin maar je voelt wel de warmte van de zon.
 - Warme vochtige lucht stijgt op en vormt wolken.
 - Döner kebab wordt lekker gaar en sappig aan het spit.

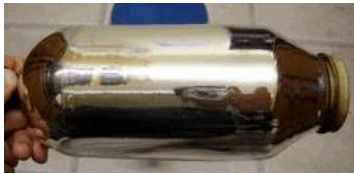


2. Bekijk de afbeelding linksboven. Je steekt tegelijkertijd een staafje koper en een staafje plastic in een bekglas met heet water. In welke hand voel je als eerst de warmte?

3. Bekijk de kaart hiernaast met de belangrijkste waterstromen in de Atlantische Oceaan. Dankzij deze stromen is het in Nederland in de winter een stuk warmer dan in New York terwijl die laatste veel zuidelijker ligt. Zoek op of bedenk hoe de warmte van de warme stroom in de Atlantische Oceaan Europa warm houdt.

4. In de afbeeldingen hiernaast zie je de binnenfles van een thermoskan. Een thermosfles houdt je koffie op drie manieren warm. Noem bij elke manier welke vorm van warmtetransport wordt tegengegaan:

- De spiegelende binnenkant en buitenkant van de binnenfles.
- Tussen de binnenwand en de buitenwand van de binnenfles zit vacuüm.
- Op de fles zit een dop.



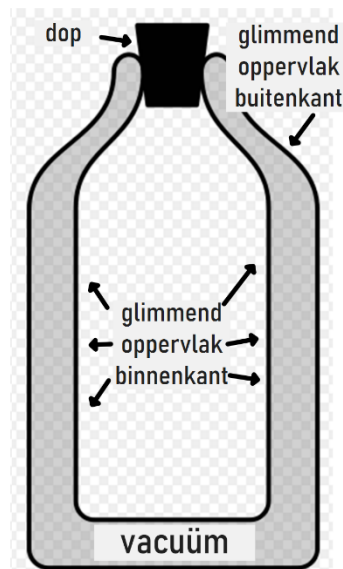
C. Uitdaginge of verdiepende opgaven

- Je kunt rekenen aan warmtetransport door geleiding met deze formule:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$$

Q is de hoeveelheid afgegeven warmte in joule (J)
 U is de U -waarde van het materiaal in joule per vierkante meter per graad Celsius per seconde ($J/(m^2 \cdot ^\circ C \cdot s)$)
 A is de oppervlakte van de wand in vierkante meter (m^2)
 ΔT is het temperatuurverschil tussen binnen en buiten in graden Celsius ($= T_{\text{binnen}} - T_{\text{buiten}}$)
 t is de tijdsduur in seconde (s)

- Een groot getal voor de U -waarde betekent dat een materiaal de warmte goed geleidt. Leg uit hoe je dat aan de formule kunt zien.
- Je hebt met bakstenen een schuurtje gemaakt om 's winters aan je motorfiets te kunnen sleutelen. Het totale oppervlak van alle muren samen is 18 m^2 . De muren bestaan uit een enkele laag bakstenen. Op een koude dag is het buiten $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Je zet de kachel binnen stevig aan zodat het daar $20 \text{ }^\circ\text{C}$ blijft. Reken uit hoeveel warmte je schuurtje per uur verliest aan de buitenlucht.
- Elke $3,6 \times 10^6 \text{ J}$ die je kachel vanuit elektriciteit omzet naar warmte kost $0,20$ cent. Bereken de kosten als je op deze dag $3,5$ uur in je schuurtje zit.
- Je herbouwt het schuurtje nu met spouwmuren met 13 cm glaswol. Op een bepaalde dag is het temperatuurverschil binnen-buiten $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Bereken hoe lang het duurt totdat er 200 kJ aan warmte door de muren is geleidt.



materiaal	U -waarde $J/(m^2 \cdot ^\circ C \cdot s)$
enkel glas	5,7
dubbel glas	3,5
enkele muur	8,5
spouwmuur met lucht	2,7
met 3 cm purschuim	0,67
met 6 cm purschuim	0,38
met 13 cm glaswol	0,25
met 13 cm pur hardschuimplaat	0,23
met 8 cm pir hardschuimplaat	0,25
pannedak enkel beschot	4,5
pannedak dubbel beschot	2,0
met 4 cm purschuim	0,60



In deze afbeelding zie je een astronaut in een ruimtepak die met een stoel met stuwmotoren manoeuvreert buiten het ruimtestation (niet in de foto te zien). Zulke activiteiten buiten een ruimtevaartuig worden EVA's genoemd: *extravehicular activities*. Het pak zorgt dat de astronaut warm blijft en lucht heeft in het vacuüm van de ruimte, maar het zorgt ook dat de druk om het lichaam van de astronaut heen hetzelfde is als op aarde. In deze paragraaf leer je over druk.

§6 Gassen en luchtdruk

In paragraaf 3 hebben we gezien hoe **luchtdruk** te verklaren is met het deeltjesmodel: de moleculen van de lucht botsen van binnenuit tegen de wand van bijvoorbeeld een ballon. Door deze continue barrage van botsende moleculen ervaart de ballonwand een kracht van binnenuit naar buiten. Zo zijn alle verschijnselen die met luchtdruk te maken hebben te verklaren.

In een kleine ballon met een inhoud van 1,0 L stuiteren maar liefst zo'n $1,2 \times 10^{21}$ moleculen in het rond. Gemiddeld botsen er zo'n $5,0 \times 10^{16}$ luchtmoleculen per seconde tegen elke cm^2 aan binnenoppervlak van de ballon.

Ook de lucht om ons heen bestaat uit rond stuiterende moleculen en oefent dus ook kracht uit. Gemiddeld duwt de lucht op elke cm^2 met een kracht van 10 newton. De luchtdruk op **zeeniveau** om ons heen is dus 10 N per cm^2 . Door deze kracht lijkt alsof er op elke cm^2 een massa van 1,0 kg drukt.

Druk is een grootheid die wordt aangegeven met als symbool de kleine letter p . Helemaal volledig kun je dus schrijven: "op zeeniveau geldt: $p = 10 \text{ N/cm}^2$ ".

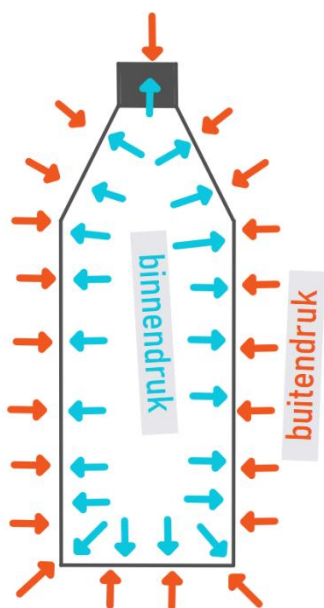
Andere eenheden voor luchtdruk zijn:

- ✓ bar: 1 bar = 1000 mbar = 10 N/cm²
- ✓ atmosfeer: 1 atm = 10 N/cm²
- ✓ pascal 100.000 Pa = 10 N/cm²
- ✓ kilopascal: 100 kPa = 10 N/cm²



In de rest van dit boek werken we alleen met de N/cm^2 als eenheid van druk.

Binnendruk, buitendruk en drukverschil



Mogelijk vraag je jezelf af waarom holle voorwerpen zoals een leeg plastic colaflesje niet in elkaar gedrukt wordt door die kennelijk enorme kracht die de lucht om ons heen op alles uitoefent. Het antwoord is dat er binnenin het flesje ook lucht is die van binnen naar buiten duwt. Omdat deze druk buiten het flesje even groot is als de druk binnen het flesje gebeurt er niets. De druk binnenin het flesje noem je **binnendruk**. De druk buiten het flesje noem je **buitendruk**. Tussen de binnendruk en de buitendruk kan een **drukverschil** bestaan. Als je een flesje normaal leegdrinkt en dan de dop er weer op draait zullen de binnendruk en de buitendruk even groot zijn. Het drukverschil is dan nul en er gebeurt verder niks.

Plaats je nu echter het flesje met afgesloten dop onder een vacuümstolp en zuig je de lucht onder de stolp weg met een pomp dan zal voor het flesje de buitendruk steeds verder afnemen. De binnendruk verandert niet omdat de lucht binnenin het flesje niet weggepompt wordt: de dop zit er immers op. Desondanks verandert het drukverschil wel. Je kunt zeggen dat er een steeds grotere **overdruk** ontstaat **in het flesje**. Hierdoor zwelt het flesje een beetje op. Hoe groot het drukverschil is kun je uitrekenen:

Voorbeeld 1: Een glazen flesje van 0,5 L blijft nog net heel als de druk in het flesje wordt verlaagd naar $5,7 \text{ N/cm}^2$. Dit experiment heb je uitgevoerd bij normale druk op zeeniveau, dus 10 N/cm^2 . Reken uit wat het drukverschil is tussen de ruimte in het flesje en buiten het flesje.

Uitwerking: De binnendruk is $5,7 \text{ N/cm}^2$. De buitendruk is 10 N/cm^2 . Het verschil tussen deze twee is $4,3 \text{ N/cm}^2$ en de buitendruk is groter, dus de kracht op het flesje is netto dus naar binnen gericht.

Voorbeeld 2: Je hebt een ballon opgeblazen waardoor er binnenin een overdruk van $7,9 \text{ N/cm}^2$ is ten opzichte van de druk buiten de ballon. De luchtdruk buiten is die dag $9,8 \text{ N/cm}^2$. Hoe groot is de druk binnenin de ballon?

Uitwerking. Buiten de ballon heerst die dag een luchtdruk van $9,8 \text{ N/cm}^2$ en de druk binnenin is $7,9 \text{ N/cm}^2$ hoger, dus de binnendruk is $17,7 \text{ N/cm}^2$.

Tussentijdse oefenopgaven overdrukverschil

1. In je fietsband heerst een binnendruk van 25 N/cm^2 . Buiten de band is de luchtdruk die dag 10 N/cm^2 . Bereken de overdruk in de band.
2. In een opgeblazen ballon heerst een overdruk van $18,5 \text{ N/cm}^2$. De binnendruk in de ballon is $29,0 \text{ N/cm}^2$. Reken de buitendruk uit.
3. In een spuitbus met haarlak heerst een overdruk van $33,1 \text{ N/cm}^2$. De buitendruk is die dag $10,2 \text{ N/cm}^2$. Bereken de binnendruk in de spuitbus.



Rekenen aan luchtdruk, kracht en oppervlakte

Je kunt rekenen aan luchtdruk, oppervlakte en kracht met deze formule:

In woorden: $\text{druk} = \frac{\text{kracht}}{\text{oppervlakte}}$ in symbolen: $p = \frac{F}{A}$

De eenheid van druk is N/cm². De eenheid van kracht is N. Voor oppervlakte gebruiken we cm² als eenheid.

De twee andere vormen van de formule kun je zelf herleiden met de makkelijke-getallen-techniek. Deze vormen zijn:

kracht uitrekenen: $F = p \cdot A$ oppervlakte uitrekenen: $A = \frac{F}{p}$

Voor het werken met deze formule heb je de basisvaardigheden uit *Hoofdstuk 1: Introductie* nodig, namelijk dat je kunt werken met voorvoegsels (§2), dat je formules kunt herleiden (§8) en dat je weet hoe je rekenvraagstukken kunt aanpakken (§9).

Voorbeeld 3: Een zuignap met een oppervlakte van 12 cm² wordt tegen een glazen ruit aangedrukt zodat alle lucht eronder vandaan geduwd wordt. Er heerst die dag een luchtdruk van 10 N/cm². Reken uit hoe hard de lucht de zuignap tegen de ruit aanduwt.

Uitwerking: Gebruik de vorm van de formule waarmee je de kracht kunt uitrekenen. De gegevens staan al in de juiste eenheden dus die kun je zo invullen.

Formule invullen: $F = p \cdot A = 10 \text{ N/cm}^2 \cdot 12 \text{ cm}^2 = 120 \text{ N}$

Let op: in een situatie met een drukverschil tussen binnendruk en buitendruk kun deze formule ook gebruiken. Je vult dan dit **drukverschil** in voor de p.

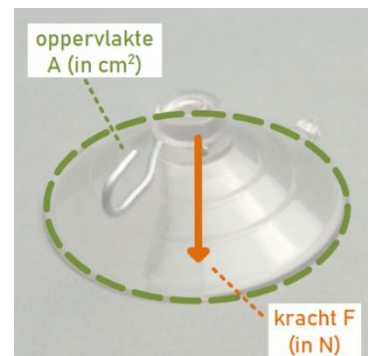
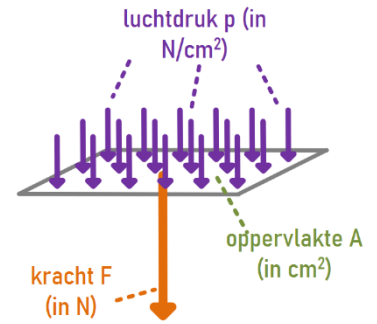
Voorbeeld 4: Later heb je een zuignap maar je duwt niet alle lucht eronder uit waardoor er een binnendruk van 3,7 N/cm² onder de zuignap blijft heersen. De buitendruk is weer 10 N/cm². Reken uit met welke kracht de zuignap nu tegen de ruit wordt geduwd.

Uitwerking: In dit voorbeeld moet je een tussenstap zetten voordat je de drukformule kunt gebruiken. Je moet namelijk eerst het drukverschil bepalen.

Tussenstap: de buitendruk is 10 N/cm² en de binnendruk is 3,7 N/cm², dus het drukverschil is 6,3 N/cm². Dit drukverschil vullen we in voor p in de formule.

Formule invullen: $F = p \cdot A = 6,3 \text{ N/cm}^2 \cdot 12 \text{ cm}^2 = 63 \text{ N}$

De zuignap wordt nu dus netto minder hard tegen de glazen ruit aangedrukt omdat er nog lucht onder de zuignap is die terugduwt.





Voorbeeld 5: Je neemt een fietspomp en je houdt het ventiel met je vinger dicht. Je duwt de zuiger met het handvat zo ver mogelijk naar beneden zodat er nog net geen lucht ontsnapt. De zuiger in de pomp heeft een oppervlak van 40 cm² en je duwt met een kracht van 50 N tegen het handvat. Wat is dan de overdruk in de pomp onder de zuiger die je veroorzaakt met deze kracht? En wat is de echte druk in de pomp?

Uitwerking: Je weet de kracht en het oppervlak, dus je kunt de extra druk die je met deze kracht veroorzaakt binnenin de pomp uitrekenen.

Formule invullen:
$$p = \frac{F}{A} = \frac{50 \text{ N}}{40 \text{ cm}^2} = 1,2 \text{ N/cm}^2$$

Eindantwoord: deze overdruk komt bovenop de normale druk (10 N/cm²) die binnen en buiten de pomp heerst als je er niet tegen het handvat duwt. De totale druk in de pomp is dan dus 11,2 N/cm². De overdruk is de waarde die de drukmeter op de pomp aangeeft.



Voorbeeld 6: Je wilt een telefoonhouder met een zuignap gebruiken om je telefoon aan de voorruit van je auto vast te maken. Om de telefoon te dragen moet de zuignap minstens met een kracht van 125 N tegen de ruit geduwd worden door de luchtdruk. Onder de zuignap heerst nog een druk van 1,6 N/cm². Welk oppervlak moet de zuignap minstens hebben zodat deze je telefoon kan dragen? Ga uit van de normale buitendruk op zeeniveau.

Uitwerking: Voordat je de eindberekening maakt met de drukformule reken je als tussenstap eerst het drukverschil uit: 10 N/cm² - 1,6 N/cm² = 8,4 N/cm². Dit drukverschil vul je in in de drukformule, samen met de kracht. Om de oppervlakte uit te rekenen gebruik je de formule in de daarvoor geschikte vorm:

Formule invullen:
$$A = \frac{F}{p} = \frac{125 \text{ N}}{8,4 \text{ N/cm}^2} = 14,9 \text{ cm}^2$$

De drukformule is de drie-letterformule die hoort bij dit hoofdstuk. Let er op dat je bij rekenopgaven over luchtdruk vaak eerst als tussenstap het drukverschil moet uitrekenen. Alleen als een binnendruk nul is (zie voorbeeld 3) kun je de buitendruk rechtstreeks in de drukformule invullen. Voor rekenopgaven over luchtdruk kun je ook prima het driestappenplan uit paragraaf 8 van hoofdstuk 1 gebruiken.

Oefenopgaven bij §6

A. Basisopgaven

4. Bekijk de vijf rekenvoorbeelden in deze paragraaf. Bedek de uitwerkingen en maak deze voorbeelden alsof het opgaven zijn. Schrijf ze ook zo op in je schrift.

5. Je hebt een zuignap met een oppervlak van 20 cm^2 tegen de koelkastdeur gedrukt. Onder deze zuignap heerst vacuüm. Bereken de kracht waarmee de zuignap tegen de koelkastdeur gedrukt wordt. Ga uit van een buitendruk van 10 N/cm^2 .

6. Om jam langer houdbaar te maken kun je deze in een glazen potje onder lage druk stoppen zoals in de afbeelding. S.t.el, van een bepaald potje is de druk onder het deksel $1,2 \text{ N/cm}^2$. De buitendruk die dag is $10,1 \text{ N/cm}^2$.

Reken uit wat het drukverschil is.

Het oppervlak van het deksel is 35 cm^2 . Bereken de kracht waarmee het tegen de pot wordt aangedrukt.

7. Er bestaan speciale zuignappen om glazen platen mee op te tillen. Deze zuignappen moeten minstens een kracht van 200 N kunnen leveren. Ga in deze opgave uit van een buitendruk van 10 N/cm^2 .

- Onder zuignap A heerst een druk van $1,6 \text{ N/cm}^2$. Deze zuignap heeft een oppervlak van 32 cm^2 . Bereken de kracht die de zuignap uitoefent op de ruit.
- Onder zuignap B heerst ook een druk van $1,6 \text{ N/cm}^2$. Deze zuignap is precies groot genoeg om de benodigde kracht te kunnen leveren. Reken uit wat het oppervlak van deze zuignap is.
- Zuignap C kan ook precies 200 N leveren en heeft een oppervlak van 50 cm^2 . Reken uit wat de binnendruk onder deze zuignap is.

8. In de tekst van deze paragraaf staat dat de luchtdruk op zeeniveau ongeveer 10 N/cm^2 is. Dit komt overeen met 100 kPa . Kijk in de figuur hiernaast. Geef de luchtdruk op deze hoogten. Gebruik je geodriehoek om nauwkeurig af te lezen.

- 5 km
- 10 km
- 20 km

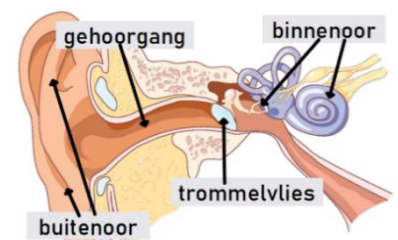
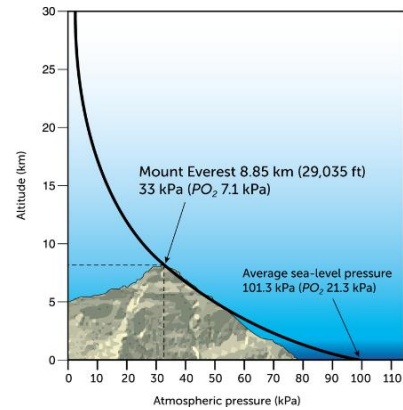
9. Bekijk de afbeelding van een drukmeter hiernaast. Lees de drukmeter af en schrijf de waarde compleet op, inclusief grootheid en eenheid. De meter geeft de druk in bar. Reken de waarde om naar N/cm^2 en schrijf deze weer compleet op.

10. Luchtdruk kan aan voorwerpen stevigheid geven. Noem drie voorwerpen die hun stevigheid te danken hebben aan luchtdruk.

11. Bekijk afbeelding X. Je hebt een zak chips gekocht en bent toen een eind de bergen in gereden. Je bevindt je nu op een hoogte van 2000 meter en je haalt de zak chips uit je rugzak. Deze is helemaal bol komen te staan. Leg uit hoe dit kan.

12. Bekijk de schematische afbeelding van je oor in afbeelding. Het trommelvlies is een luchtdichte barrière tussen je buitenoer en je binnenoer. Als er drukverschil is tussen je binnenoer en je buitenoer staat het trommelvlies bol, wat pijnlijk kan zijn.

- Leg uit welke kant op het trommelvlies doorbuigt als je met de auto een berg oprijdt.
- In het vliegtuig kunnen je oren ook pijn gaan doen bij het opstijgen. Leg uit hoe dit komt.



B. Extra oefenen

13. Je pompt je fietsband op met een pomp die ook een drukmeter heeft. De drukmeter van de pomp geeft de overdruk in de band t.o.v. de druk buiten de band aan. De luchtdruk om je heen is op die dag 10 N/cm^2 . Beantwoord deze vragen:

- Welke druk heerst in de band als de drukmeter aangeeft $p = 15 \text{ N/cm}^2$?
- Als er een druk van 46 N/cm^2 in de band heerst, welke waarde geeft de drukmeter dan aan?
- Meestal geeft zo'n drukmeter de overdruk in de band aan in de eenheid bar. Welke waarde geeft de meter aan als de druk in de band drie keer zo groot is als de buitendruk?

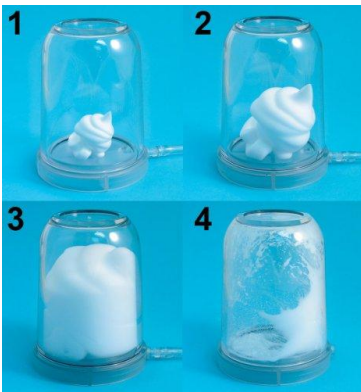


14. Je drukt een zuignap met haakje met haakje op een tegelwand zodat de luchtdruk onder de zuignap nul is. Buiten de zuignap heerst een druk van $10,2 \text{ N/cm}^2$. De oppervlakte van de zuignap is 16 cm^2 .

- Bereken met hoeveel kracht de zuignap tegen de tegelwand wordt aangedrukt.
- Je wilt een zuignap met haakje kopen dat minstens 25 N kan leveren aan kracht. Reken uit hoe groot de oppervlakte van deze zuignap minstens moet zijn.

15. In een cilinder zoals op de afbeelding hieronder zit lucht met een druk van 18 N/cm^2 . De zuiger in de cilinder heeft een oppervlak van 28 cm^2 . De luchtdruk buiten de cilinder is 10 N/cm^2 .

- Reken uit met hoeveel kracht de lucht van binnenuit tegen de zuiger aandrukt.
- Reken uit met hoeveel kracht de lucht buiten de cilinder tegen de zuiger aandrukt.



16. Bekijk de afbeelding van een hoeveelheid scheerschuim onder een vacuümstolp hiernaast. Het schuim bestaat uit water met veel kleine luchtbelletjes erin. Als je de lucht onder de stolp wegpomp zwelt het schuim enorm op. Leg uit hoe dat komt.

17. Als je fietsband is leeggelopen, heerst er dan vacuüm in je band? Wat wordt hier bedoeld met "leeg"? En welke druk heerst er in een lekke fietsband?

C. Verdiepende opgaven

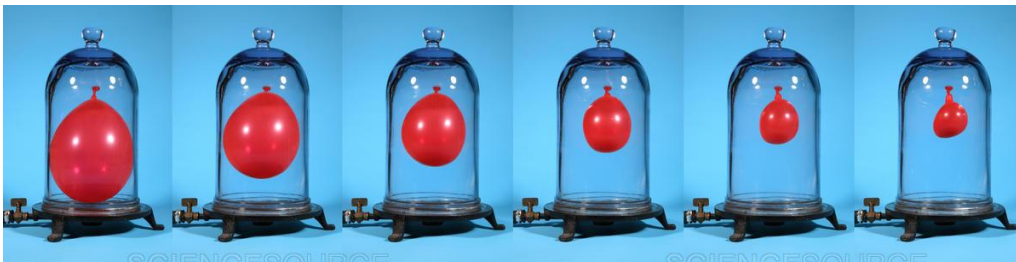
18. In de afbeelding hiernaast zie je een model van de longen dat in een flesje ingebouwd is. De rode ballonnetjes stellen de longen voor. Het blauwe rubberen vlies waar je met je hand aan trekt is een spier in je buikholte: het *middenrif*. In dit model zit de dop op de fles zodat er geen lucht de ballonnetjes in of uit kan stromen.

- Leg uit wat er gebeurt als je zoals in de afbeelding aan het middenrif trekt.
- Stel dat de dop niet op de fles had gezeten. Wat was er dan gebeurt als je het middenrif omlaag trekt?

19. Je drukt een zuignap met haakje met haakje op een tegelwand zodat de luchtdruk onder de zuignap nul is. Buiten de zuignap heerst een druk van $10,2 \text{ N/cm}^2$. De oppervlakte van de zuignap is 16 cm^2 .

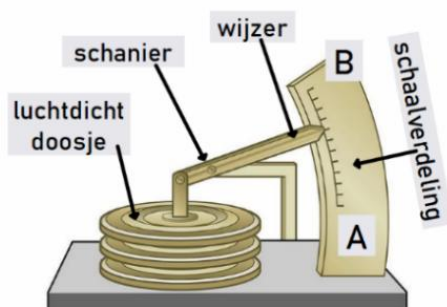
- Bereken met hoeveel kracht de zuignap tegen de tegelwand wordt aangedrukt en reken ook uit hoeveel massa de zuignap dan zou moeten kunnen dragen.
- Je wilt een zuignap met haakje kopen dat minstens een massa van $2,5 \text{ kg}$ kan dragen. Reken uit hoe groot de oppervlakte van deze zuignap minstens moet zijn.

20. Bekijk de serie foto's in afbeelding hieronder. Dit is een *dichtgeknoopte* ballon onder een vacuümstolp. Stel de foto's zijn van links naar rechts in de tijd genomen. Dus de linkerfoto is als eerste genomen en de meest rechterfoto als laatste. Lief hier lucht de *stolp* in of uit?

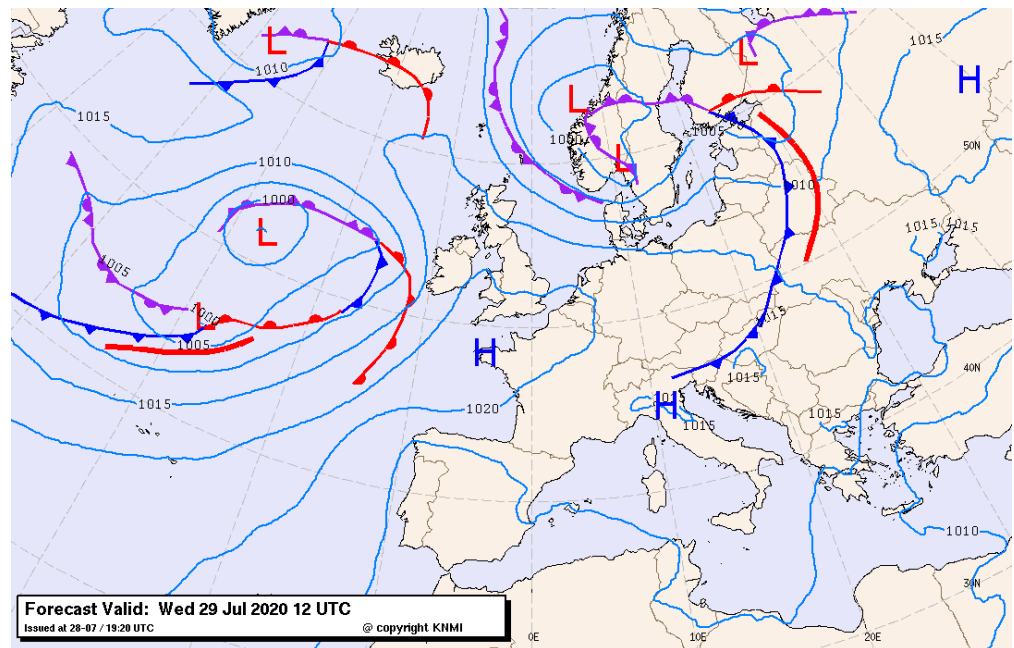


21. Bekijk de afbeelding hieronder. Je ziet hier een schematische tekening van een barometer. Dit is een apparaat waarmee je druk kunt meten. Het luchtdichte doosje kan verticaal ingedrukt of uitgerekt worden.

- Leg uit hoe de barometer werkt. Begin je uitleg bijvoorbeeld met: "Als de druk buiten het doosje toeneemt, dan...".
- Leg uit of de hoogste druk op de schaalverdeling bij punt A of bij punt B staat.



22. Bekijk de weerkaart van 29 Juli 2020. Je ziet waar de hogedrukgebieden en lagedrukgebieden die dag hingen boven Europa. Voorspel in welke richting de wind in Nederland woei die dag.



23. In de afbeelding hieronder zie je een oude tekening van een duikerklok. Zulke duikklokken bestaan uit een soort omgekeerde emmer die onder water wordt gelaten aan een touw vanaf een schip. Een paar zware gewichten onderaan zorgen dat de klok met de opening naar beneden gericht blijft. Een duikerklok kon gebruikt worden om onderzoek aan de bodem uit te voeren als de duikers langer onder water wilden blijven.

- Leg uit waarom er geen water in het zitgedeelte van de klok komt.
- Bereken waarom de duikers niet oneindig lang onder water konden blijven op deze manier.
- Bekijk afbeeldingen van duikerklokken op internet en leg uit welke oplossing moderne klokken tegen dit probleem hebben.

