

# GASSEN EN DAMPEN

- § 1 Ideale gassen
- § 2 Onverzadigde en verzadigde damp
- § 3 Verzadigingsdruk
- § 4 Kokende vloeistoffen
- § 5 Kritische temperatuur van een stof

# § 1 Ideale gassen

## Verschil tussen een gas en een damp

Zuurstof en stikstof kennen we in het dagelijks leven alleen in de gasvormige fase. We spreken dan van gassen. Water en alcohol komen we niet alleen in de gasfase tegen, maar ook in de vloeibare fase. In zulke gevallen spreken we over dampen. Moleculen van dampen kunnen veel gemakkelijker groepjes vormen (aan elkaar kleven) dan gasmoleculen ten gevolge van de onderlinge aantrekkingskrachten. Met andere woorden, dampen kunnen veel gemakkelijker condenseren.

In deze paragraaf kijken we naar het gedrag van gassen en nemen daarbij aan dat de moleculen elkaar niet aantrekken. Condensatie is dan dus onmogelijk. Bovendien nemen we aan, dat de gassen niet zo sterk worden samengeperst, dat de afmetingen van de moleculen een rol gaan spelen. We kunnen de gassen dan beschouwen als zogenoemde 'ideale gassen'.

## Wat is een ideaal gas?

Onder een ideaal gas verstaan we een gas waarvan:

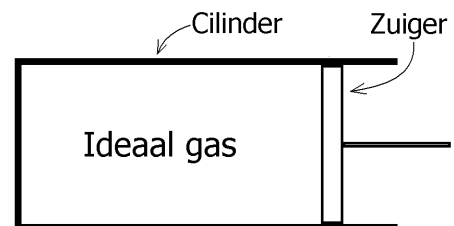
- de moleculen geen aantrekkingskracht op elkaar uitoefenen
- de moleculen zo klein zijn dat ze als puntmassa's kunnen worden opgevat.

In de praktijk bestaan er geen ideale gassen omdat moleculen altijd aantrekkingskrachten op elkaar uitoefenen en bovendien niet oneindig klein zijn. Toch heeft het nut om over ideale gassen te praten. Voor ideale gassen geldt namelijk de algemene gaswet (zie hierna). Deze wet kan binnen zekere grenzen ook toegepast worden op bestaande gassen en dampen. De algemene gaswet geldt echter niet meer als de damp op het punt staat te condenseren.

## De drie grootheden van een gas in een afgesloten ruimte

Stel dat er een ideaal gas in een afgesloten ruimte (zoals een cilinder) zit. Zie de figuur hiernaast. De toestand van het gas wordt dan door drie grootheden beschreven namelijk:

- $p$  = de druk van het gas
- $V$  = het volume van het gas
- $T$  = de absolute temperatuur van het gas (uitgedrukt in kelvin).



Deze grootheden zijn niet onafhankelijk van elkaar. Bijvoorbeeld zal een temperatuurverhoging of een volumeverkleining een toename van de druk tot gevolg hebben.

## Constate temperatuur

Stel dat je het gas in de cilinder in de bovenstaande figuur onderzoekt. Het blijkt dan dat als je het gas samenperst (door de zuiger naar binnen te bewegen), de druk van het gas toeneemt. Dit is logisch als je bedenkt dat de gemiddelde afstand tussen de moleculen kleiner wordt. Het aantal moleculen dat per seconde tegen een vierkante centimeter wandoppervlak botst, wordt dan groter.

Als je er voor zorgt dat de temperatuur van het gas tijdens het samenpersen gelijk blijft, blijkt een halvering van het volume te leiden tot een verdubbeling van de druk. Als het gas in de oorspronkelijke toestand bijvoorbeeld een volume heeft van 6 liter en een druk van  $10 \text{ N/cm}^2$ , zal het gas bij een volume van 3 liter een druk hebben van  $20 \text{ N/cm}^2$ . Nogmaals, dit geldt alleen als de temperatuur gelijk is gebleven.

Vaak wordt de oorspronkelijke toestand met 1 aangeduid en de nieuwe toestand met 2. We kunnen het bovenstaande getallenvoorbeeld dan als volgt overzichtelijk weergeven.

$$\begin{aligned}V_1 &= 6 \text{ L}, \\p_1 &= 10 \text{ N/cm}^2, \\V_2 &= 3 \text{ L}, \\p_2 &= 20 \text{ N/cm}^2, \\T &= \text{constant}.\end{aligned}$$

Deze waarden voldoen aan de Wet van Boyle. Deze luidt als volgt.

**Bij een afgesloten hoeveelheid ideaal gas waarvan de temperatuur constant is, is de uitkomst van druk keer volume steeds gelijk.**

In formulevorm kun je deze wet als volgt opschrijven.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

## Constant volume

Als je het gas in de eerder genoemde cilinder verwarmd, blijkt de druk van het gas hierdoor toe te nemen. Dit is makkelijk te begrijpen want als de gemiddelde snelheid van de moleculen groter wordt, worden de botsingen tegen de wand krachtiger.

Als je er voor zorgt dat het volume van het gas tijdens het verwarmen gelijk blijft (door de zuiger niet te verplaatsen), blijkt een verdubbeling van de absolute temperatuur te leiden tot een verdubbeling van de druk. Als het gas in de oorspronkelijke toestand (toestand 1) bijvoorbeeld een temperatuur van 250 kelvin ( $= -23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en een druk  $10 \text{ N/cm}^2$  heeft, zal bij 500 kelvin ( $= 227 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de druk  $20 \text{ N/cm}^2$  zijn (toestand 2). Kort opgeschreven wordt dit:

$$\begin{aligned}T_1 &= 250 \text{ K}, \\p_1 &= 10 \text{ N/cm}^2, \\T_2 &= 500 \text{ K}, \\p_2 &= 20 \text{ N/cm}^2, \\V &= \text{constant}.\end{aligned}$$

Deze waarden voldoen aan de Tweede wet van Gay Lussac. Deze luidt als volgt.

**Bij een afgesloten hoeveelheid ideaal gas waarvan het volume constant is, is de uitkomst van druk gedeeld door (absolute) temperatuur steeds gelijk.**

In formulevorm kun je deze wet als volgt opschrijven.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

### Constante druk

Als je het gas in de eerder genoemde cilinder verwarmd en de druk daarbij constant wilt houden, moet je het volume vergroten (door de zuiger naar rechts te bewegen). Als de botsingen tegen de wand namelijk krachtiger worden, moet je het aantal botsingen per vierkante centimeter wandoppervlak kleiner maken. Dat bereik je door de afstand tussen de moleculen groter te maken. In situaties zoals deze geldt de Eerste wet van Gay Lussac. Deze luidt als volgt.

**Bij een afgesloten hoeveelheid ideaal gas waarvan de druk constant is, is de uitkomst van volume gedeeld door (absolute) temperatuur steeds gelijk.**

In formulevorm kun je deze wet als volgt opschrijven.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

### De voorgaande drie wetten in één formule

De voorgaande drie wetten kunnen gecombineerd worden tot één 'superwet': de zogenoemde 'algemene gaswet'. Deze luidt als volgt.

**Bij een afgesloten hoeveelheid ideaal gas is de uitkomst van druk keer volume gedeeld door (absolute) temperatuur steeds gelijk.**

In formulevorm kun je deze wet als volgt opschrijven.

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

### Voorbeeld van het gebruik van de algemene gaswet

Een luchtballon bevat heliumgas. De druk in de ballon is 0,10 MPa, de inhoud van de ballon is 10,0 liter en de temperatuur van het gas is 20 °C. De ballon wordt losgelaten en stijgt naar grote hoogte. Daar is de inhoud van de ballon 14,0 liter en de temperatuur -20 °C. Bereken de druk in de ballon op die hoogte.

#### Oplossing

Gegeven:  $p_1 = 0,10 \text{ MPa}$   
 $V_1 = 10,0 \text{ L}$   
 $T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$   
 $V_2 = 14,0 \text{ L}$   
 $T_2 = -20 + 273 = 253 \text{ K}$

Gevraagd:  $p_2$

Oplossing:  $\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$   
 $\frac{0,10 \cdot 10,0}{293} = \frac{p_2 \cdot 14,0}{253}$   
 $p_2 = 0,062 \text{ MPa}$

#### Opmerking

Bij het toepassen van de algemene gaswet mogen de eenheden van druk en volume vrij gekozen worden. Voorwaarde is alleen wel dat ze voor toestand 1 en 2 gelijk zijn. De eenheid van temperatuur moet kelvin zijn (geen celsius!).

# Opgaven bij § 1

## Opgave 1

Wat verstaan we onder een ideaal gas?

## Opgave 2

Waarom zal een ideaal gas nooit condenseren?

## Opgave 3

Schrijf de algemene gaswet in formulevorm op.

## Opgave 4

Aan welke voorwaarde moet in ieder geval worden voldaan om de algemene gaswet toe te kunnen passen op bestaande gassen en dampen?

## Opgave 5

Verreweg de meeste huizen in Nederland zijn aangesloten op het aardgasnetwerk. De gasdruk in de toevoerleiding blijft gedurende het hele jaar constant. Aardgas wordt per kubieke meter betaald. Dit is in de zomer ongunstig en in de winter gunstig omdat het binnenkomende aardgas in de zomer (gemiddeld genomen) een hogere temperatuur heeft. Leg dat uit aan de hand van moleculen.

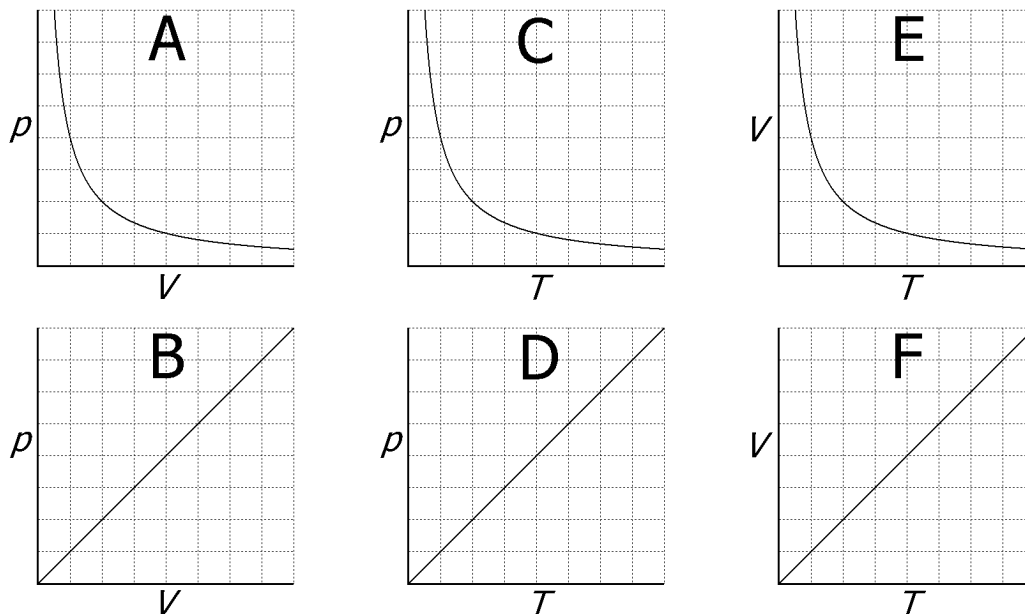
### Opgave 6

De toestand van een afgesloten gas kan door drie grootheden worden beschreven, namelijk de druk  $p$ , het volume  $V$  en de (absolute) temperatuur  $T$ .

Welke van de onderstaande diagrammen A of B geeft het verband tussen druk en volume bij gelijkblijvende temperatuur correct weer?

Welke van de onderstaande diagrammen C of D geeft het verband tussen druk en temperatuur bij gelijkblijvend volume correct weer?

Welke van de onderstaande diagrammen E of F geeft het verband tussen volume en temperatuur bij gelijkblijvende druk correct weer?



Ter informatie

Een grafiek bij een constante temperatuur heet een isotherm.

Een grafiek bij een constant volume heet een isochoor.

Een grafiek bij een constante druk heet een isobaar.

### Opgave 7

Een afgesloten hoeveelheid (ideaal) gas heeft een druk van 0,10 MPa, een volume van 2,6 liter en een temperatuur van 35 °C. Het gas wordt samengeperst tot een volume van 1,0 liter waarbij de temperatuur oploopt tot 80 °C. Bereken de druk in de nieuwe situatie.

### Opgave 8

Een afgesloten hoeveelheid (ideaal) gas heeft een druk van 0,40 MPa, een volume van  $8 \text{ m}^3$  en een temperatuur van  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Het gas wordt samengeperst tot een volume van  $2 \text{ m}^3$  waarbij de druk oploopt tot 1,0 MPa. Bereken de temperatuur in de nieuwe situatie.

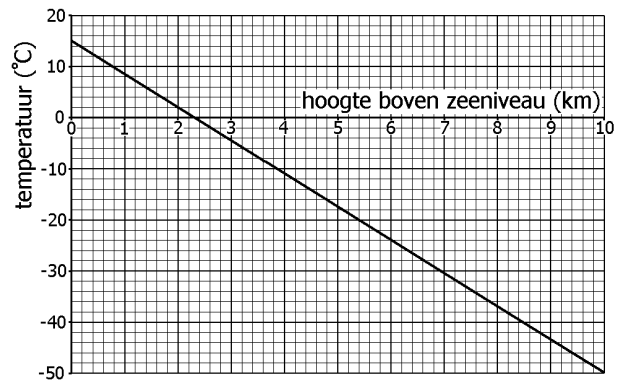
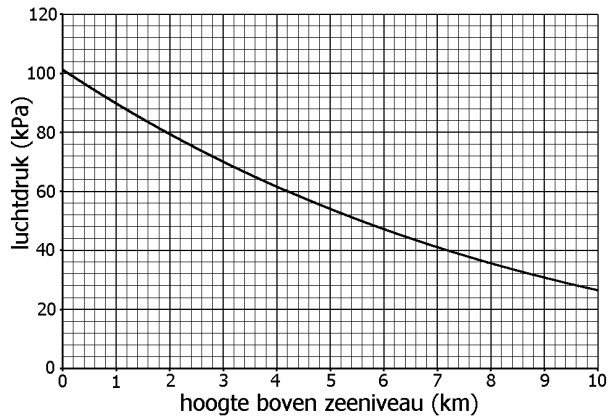
### Opgave 9

Een luchtbel stijgt in het water omhoog. Het beginvolume is  $2 \text{ cm}^3$  en de begindruk 2,0 bar. De einddruk (vlak bij het wateroppervlak) is 1,0 bar. Bereken het eindvolume van de luchtbel als de temperatuur van de lucht gelijk is gebleven.



### Opgave 10

Een weerballon wordt gevuld met waterstof. Omdat waterstof een zeer licht gas is, zal de ballon na loslaten tot grote hoogte opstijgen. Bij het loslaten (op zeeniveau) zit er  $4,0 \text{ m}^3$  waterstof in de ballon. Bereken het volume van het waterstof als de ballon gestegen is tot  $7,0 \text{ km}$  hoogte. Neem hierbij aan dat de druk en de temperatuur binnen de ballon gelijk zijn aan die buiten de ballon. Gebruik de onderstaande diagrammen waarin de druk en de temperatuur van de dampkring tegen de hoogte zijn uitgezet.



## § 2 Onverzadigde en verzadigde damp

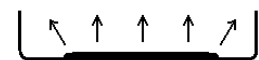
### Onverzadigde en verzadigde damp

In de figuur hiernaast is een fles voor een deel gevuld met een vloeistof. In principe kan dit elke vloeistof zijn zoals water, aceton of alcohol. Als de fles luchtdicht wordt afgesloten met een dop, zal de vloeistof na enige tijd niet meer verdampen. De ruimte boven de vloeistof kan in dat geval geen extra stof opnemen. We zeggen dan dat de damp verzadigd is. Zolang de damp nog wel extra stof kan opnemen, spreken we van een onverzadigde damp.



Het verschil tussen een verzadigde en een onverzadigde damp blijkt ook uit het volgende experiment. Zie de figuren hiernaast.

Met een pipetje wordt een kleine hoeveelheid ether (een vloeistof die snel verdampt) in twee petrischalen gespoten. De ene petrischaal heeft geen deksel, de andere wel. De ether in de open petrischaal blijkt na 10 á 20 seconde geheel te zijn verdampt. De ether in de afgesloten petrischaal zal op een bepaald moment niet verder verdampen. Er blijft vloeibaar ether op de bodem achter. Dit komt doordat de damp in de afgesloten petrischaal na enige tijd verzadigd is met ether.



De verdamping gaat door in een open ruimte.



De verdamping stopt in een afgesloten ruimte.

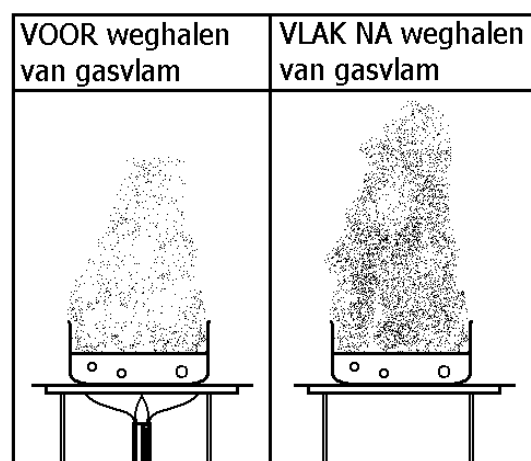
### Bij een hogere temperatuur kan de damp meer stof bevatten

De linker fles in de figuur hiernaast is van boven afgesloten en bevat een kleine hoeveelheid vloeistof. Zie de druppels op de wand. De druppels verdampen niet want de damp in de fles is verzadigd. De rechter fles stelt dezelfde fles voor maar nu bij een hogere temperatuur. De druppels zijn nu verdampt. Blijkbaar kan de damp meer moleculen bevatten bij een hogere temperatuur. Deze eigenschap geldt voor elke stof.



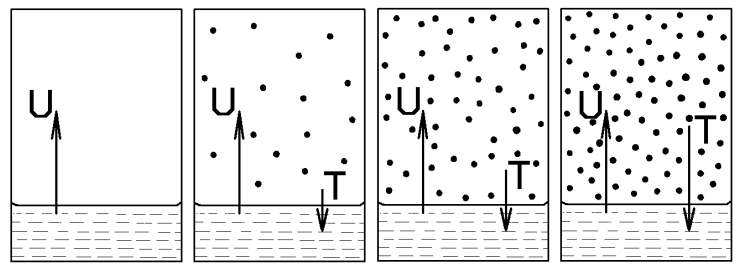
De vloeistofdruppels kunnen verdampen bij een hogere temperatuur.

We kunnen dit verschijnsel ook met het volgende proefje illustreren. Een bakje (bekerglas) met water wordt aan de kook gebracht met een brander. De opstijgende waterdamp condenseert gedeeltelijk. Dit blijkt uit de stoomwolk die boven het bakje zichtbaar is. Zie de linker figuur hiernaast. Het zijn namelijk de waterdruppeltjes die de stoomwolk zichtbaar maken. Als de brander nu met een snelle beweging wordt weggehaald, wordt de stoomwolk veel duidelijker zichtbaar. Zie de rechter figuur hiernaast. Als de warmte van de vlam verdwijnt, daalt de temperatuur boven het bakje behoorlijk. De lucht is dan dus sneller verzadigd en zal er meer waterdamp condenseren.



## Verklaring met moleculen

Stel dat er in een gesloten vat een vloeistof gebracht wordt. Aan het vloeistofoppervlak zal dan verdamping plaatsvinden. De moleculen verlaten hierbij de vloeistof. In de figuur hiernaast is dit schematisch met U (= uittocht) aangegeven. De ontsnapte moleculen zullen tegen de wanden van het vat botsen en ook tegen



U = uittocht van moleculen

T = terugkeer van moleculen

U = T  
(verzadiging)

elkaar. Een gedeelte van de moleculen krijgt hierdoor een snelheid omlaag en keert terug naar de vloeistof. In de figuur is dit met T (= terugkeer) aangegeven. Zolang stroom U groter is dan stroom T, komen er steeds meer dampmoleculen in de ruimte. Uiteindelijk zijn er zoveel dampmoleculen, dat stroom T even groot is als stroom U. Vanaf dat moment blijft het aantal dampmoleculen gelijk en is de damp verzadigd. Deze situatie is in het rechter plaatje van de figuur getekend.

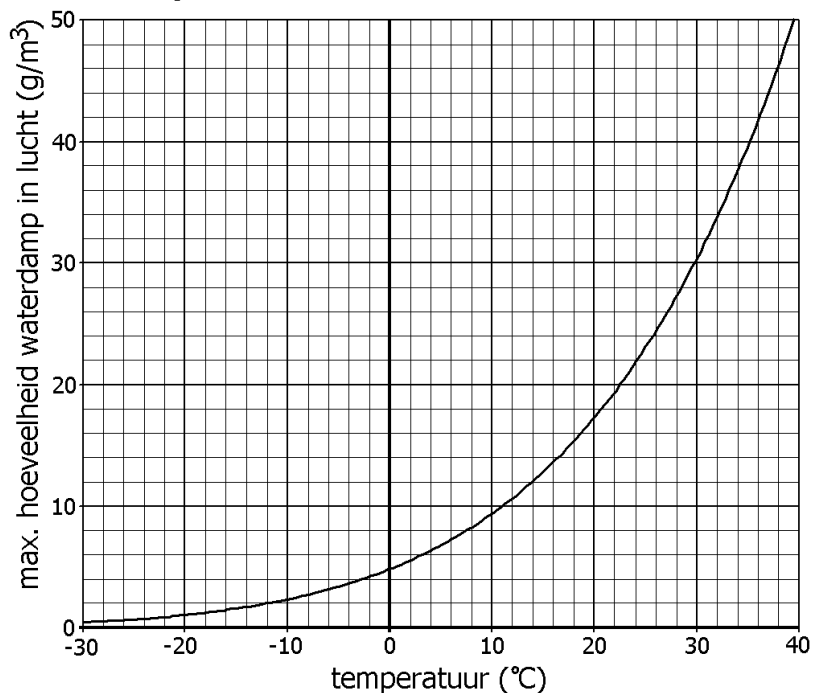
Dat een verzadigde damp bij een hogere temperatuur meer moleculen bevat, is makkelijk te begrijpen. Bij een hogere temperatuur is stroom U (uittocht) van moleculen namelijk groter. Om evenwicht te krijgen ( $T = U$ ), moeten de moleculen in de damp dichter bij elkaar zitten.

Tot zover het algemene verhaal. In het volgende kijken we alleen naar de stof water. Dat is de stof waar we in het dagelijks leven het meest mee te maken hebben.

## Verzadigingskromme van waterdamp

In de figuur hiernaast staat de grafiek afgebeeld waaruit blijkt dat warme lucht meer waterdamp kan bevatten dan koude lucht. Horizontaal staat de temperatuur uitgezet. Verticaal staat uitgezet hoeveel gram waterdamp in een kubieke meter verzadigde lucht zit.

Een kubieke meter lucht van bijvoorbeeld  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  kan maximaal 30 gram waterdamp bevatten. Bij  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  is dat slechts 5 gram. Ga dat na.



Zoals te zien is, gaat de verzadigingskromme van waterdamp beneden het vriespunt gewoon door. Dat zorgt ervoor dat het in Siberië, midden in de winter, haast nooit sneeuwt. Niet omdat het te warm is, maar omdat het te koud is. Bij  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  of lager zit er gewoon te weinig waterdamp in de lucht om sneeuw te vormen.

## Luchtvochtigheid

De luchtvochtigheid geeft aan hoeveel waterdamp er in de lucht zit. De luchtvochtigheid wordt (meestal) in procenten uitgedrukt en ligt tussen 0% en 100%. Een luchtvochtigheid van 0% wil zeggen dat er helemaal geen waterdamp in de lucht zit. Een luchtvochtigheid van 100% wil zeggen dat de lucht verzadigd is met waterdamp. Meestal ligt de luchtvochtigheid tussen de 0% en 100%. Bijvoorbeeld wil een luchtvochtigheid van 50% zeggen dat de lucht slechts de helft van de waterdamp bevat die verzadigde lucht zou bevatten.

Een luchtvochtigheid van 0% komt haast nooit voor want lucht bevat altijd wel waterdamp door verdamping van rivieren, meren enzovoort. Een luchtvochtigheid van 100% komt veel vaker voor. De lucht kan dan geen waterdamp meer opnemen. Je zweet kan niet verdampen waardoor er van zweten ook geen verkoelende werking meer uitgaat. We spreken van drukkend of benauwd weer.

De luchtvochtigheid kun je als volgt berekenen.

$$\text{luchtvochtigheid} = \frac{\text{werkelijk aantal gram waterdamp per kubieke meter lucht}}{\text{maximum aantal gram waterdamp per kubieke meter lucht}} \times 100 \%$$

Het volgende rekenvoorbeeld laat het gebruik van deze formule zien.

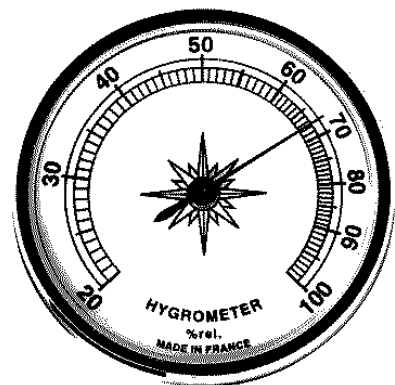
### Voorbeeld van het berekenen van de luchtvochtigheid

Stel dat de temperatuur van de buitenlucht 24 °C is en dat elke kubieke meter 15 g waterdamp bevat. Om de luchtvochtigheid te weten te komen, gebruiken we het diagram van hiervoor. We lezen hieruit af dat verzadigde lucht van 24 °C ongeveer 22 gram waterdamp per kubieke meter bevat. Ga dat na! We moeten tenslotte berekenen hoeveel procent 15 van 22 is. De berekening kunnen we op de volgende manier netjes opschrijven.

$$\text{luchtvochtigheid} = \frac{15 \text{ g/m}^3}{22 \text{ g/m}^3} \cdot 100\% = 68\%$$

## Hygrometer

Het apparaat waarmee de luchtvochtigheid gemeten kan worden, heet een hygrometer. De hygrometer in de figuur hiernaast geeft een luchtvochtigheid aan van ongeveer 68 %. Hygrometers zijn belangrijke meetinstrumenten in musea, broeikassen, sauna's, maar ook in huis wanneer een piano in goede conditie moet worden gehouden.



# Opgaven bij § 2

## Opgave 1

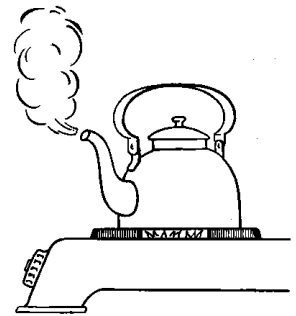
Iris verwarmt water in een ouderwetse fluitketel op het gasfornuis. Zie de figuur hiernaast. Als het water gaat koken, is vlakbij de tuit (uitstroomopening) niets te zien. Daarna is een stoomwolk zichtbaar.

Welke fase van water is aanwezig vlakbij de tuit? Omcirkel je keuze.

VAST                      VLOEISTOF                      GAS

Welke fase van water veroorzaakt het zichtbaar worden van de stoomwolk? Omcirkel je keuze.

VAST                      VLOEISTOF                      GAS



## Opgave 2

Nan schenkt een kleine hoeveelheid van een onbekende zuivere vloeistof (bijvoorbeeld alcohol, aceton of water) in een fles. Daarna sluit zij de fles luchtdicht af met een dop. Vlak na het afsluiten verdampst er nog vloeistof. Na enige tijd stopt de verdamping. Leg uit waarom de verdamping stopt.

## Opgave 3

Een huisvrouw zet het vuur onder de aardappels laag als ze ziet dat het water kookt. Pas dan wordt een stoompluim boven de pan goed zichtbaar. Leg uit hoe dat komt.

## Opgave 4

Een fabriek loost zijn hete waterdamp via een hoge fabriekspijp. Vlak boven de rand van de pijp (bijvoorbeeld de eerste 30 cm) is de waterdamp onzichtbaar. Daarboven ontstaat de witte pluim die in de wijde omtrek te zien is.

a.

Leg uit waarom de pluim niet direct bij het verlaten van de schoorsteen ontstaat.

b.

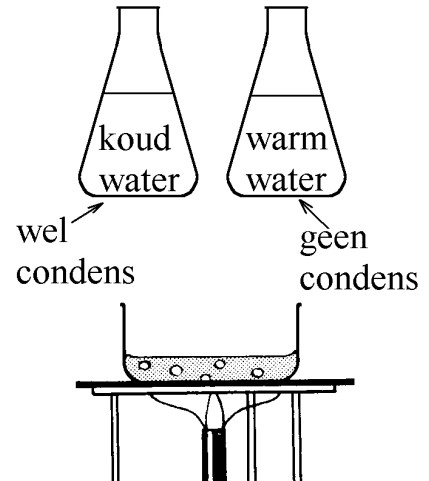
Zal de afstand tussen de rand van de pijp en het begin van de pluim groter of kleiner zijn tijdens een hittegolf? Leg je antwoord uit.

## Opgave 5

Als een vrieskist geopend wordt, zie je soms een kortdurende nevel (een wolk vloeistofdruppeltjes) bij de klep of deur. Leg duidelijk uit hoe deze nevel ontstaat.

### Opgave 6

In de figuur hiernaast kookt water in een bekeerglas. Boven het bekeerglas worden twee erlenmeyers gehouden. De ene erlenmeyer is gevuld met koud water, de andere met heet water. De buitenkant van de koude erlenmeyer wordt nat; de buitenkant van de warme erlenmeyer blijft droog. Leg uit waarom de ene erlenmeyer wel nat wordt en de andere niet. Gebruik hierbij het woord “verzadigd”.



### Opgave 7

New Delhi en Calcutta liggen beide in India.

In mei verschilt het klimaat in beide steden sterk van elkaar.

In New Delhi is het dan  $35^{\circ}\text{C}$  en de lucht is droog (luchtvochtigheid = 25 %).

In Calcutta is het dan  $30^{\circ}\text{C}$  en de lucht is vochtig (luchtvochtigheid = 90 %).

Welke van de onderstaande beweringen is juist?

Bewering 1:

De bevolking heeft het warmer in New Delhi omdat de temperatuur hoger is. De luchtvochtigheid speelt hierbij geen rol.

Bewering 2:

De bevolking heeft het warmer in New Delhi omdat de temperatuur hoger is en er weinig vocht in de lucht is. Het is juist het vocht in de lucht dat afkoeling brengt.

Bewering 3:

De bevolking heeft het warmer in Calcutta omdat het zweet nauwelijks kan verdampen vanwege de vochtige lucht. En als er geen verdamping mogelijk is, is er ook geen afkoeling.

Bewering 4:

De bevolking heeft het warmer in Calcutta omdat je daar niet zweet. En als er geen zweet is kan het ook niet verdampen.

### Opgave 8

Wanneer is er in Nederland meer kans op benauwd weer: bij (een klein beetje) wind uit het oosten of uit het westen? Licht je antwoord toe.

### Opgave 9

In een huiskamer is de luchttemperatuur  $24^{\circ}\text{C}$ . Lees in het diagram (in de leestekst) af hoeveel gram waterdamp deze lucht ten hoogste kan bevatten per kubieke meter.

Antwoord: \_\_\_\_\_

In werkelijkheid bevat de lucht maar 14 gram waterdamp per kubieke meter. Bepaal nu de luchtvochtigheid in de kamer.

### Opgave 10

Tijdens een zomerse dag heeft de buitenlucht een temperatuur van  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een luchtvochtigheid van 60%. Bereken met behulp van het diagram (in de tekst) hoeveel gram waterdamp er in een kubieke meter van deze lucht zit.

### Opgave 11

Vaak is de luchtvochtigheid in huis erg laag tijdens een strenge winter. Dit komt doordat alle binnenlucht oorspronkelijk van buiten komt, bijvoorbeeld door ventilatie en door het openen van de buitendeur. Deze lucht bevat weinig waterdamp. Als de lucht vervolgens wordt verwarmd, daalt de luchtvochtigheid. Dat komt doordat lucht bij stijgende temperatuur meer waterdamp KAN bevatten. Deze opgave gaat hierover.

Tijdens een strenge winter is het buiten al langere tijd min 20 graden celsius.

Lees uit het diagram (in de leestekst) af hoeveel gram waterdamp er maximaal in een kubieke meter van de buitenlucht zit. \_\_\_\_\_

Deze lucht wordt in huis opgewarmd tot 24 graden celsius.

Lees uit de voorgaande grafiek af hoeveel gram waterdamp er in een kubieke meter lucht van deze temperatuur ZOU KUNNEN zitten. \_\_\_\_\_

Bereken uit deze twee gegevens de luchtvochtigheid in huis. Ga er hierbij gemakshalve vanuit dat er aan de lucht geen extra waterdamp wordt toegevoegd door bijvoorbeeld te douchen of te koken.

### Opgave 12

De buitenlucht bevat aan het einde van een zomermiddag 10 gram waterdamp per kubieke meter lucht. In de loop van de avond en nacht daalt de temperatuur. Lees in de grafiek af bij welke temperatuur de waterdamp in de lucht begint te condenseren. Antwoord: \_\_\_\_\_

De temperatuur daalt tenslotte tot  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bepaal hoeveel gram waterdamp er bij die temperatuur ten hoogste in de lucht kan zitten (per kubieke meter).

Antwoord: \_\_\_\_\_

Hoeveel gram waterdamp condenseert er tijdens het afkoelen van de lucht tot  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (per kubieke meter)?

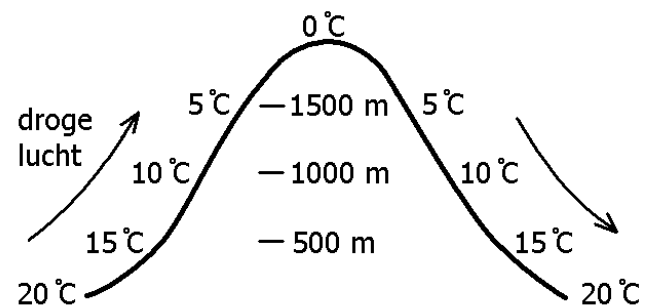
### Opgave 13

Bionda blaast een luchtbed op. Haar adem heeft een temperatuur van  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  en is verzadigd met waterdamp (de luchtvochtigheid is dus 100 %). De luchtinhoud van het opgeblazen luchtbed bedraagt  $0,14\text{ m}^3$ . Het luchtbed koelt af naar  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bereken hoeveel gram waterdamp daarbij in het luchtbed condenseert.

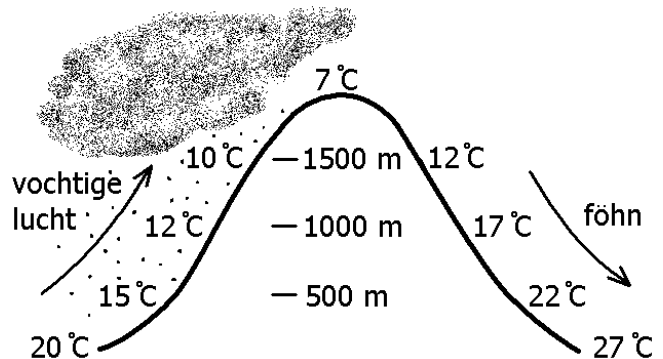
### Opgave 14

Deze opgave gaat over de föhn: warme wind, die ontstaat als vochtige lucht over de bergen trekt.

De bovenste figuur hiernaast toont het temperatuurverloop van DROGE lucht, die over een berg trekt. Als de lucht naar boven stroomt, zet de lucht uit en koelt daardoor af: ongeveer 1 graad per 100 meter. Zo daalt de temperatuur in de figuur maar liefst 20 graden. Voorbij de berg gaat de lucht weer omlaag en warmt ze met dezelfde vaart weer op. Het netto effect is dus nul.



De onderste figuur hiernaast toont het temperatuurverloop bij VOCHTIGE lucht. Bij het opstijgen van de lucht ontstaan er wolken waar veel regen uit valt. Daardoor daalt de temperatuur slechts 13 graden in plaats van 20 graden. Voorbij de berg stijgt de temperatuur wel de volle 20 graden. Het uiteindelijke effect is dus dat er warme droge lucht van de berg weg stroomt. Dit wordt een föhn genoemd.



a.

Leg uit waarom er aan de voorzijde van de berg wolken (plus regen) ontstaan.

b.

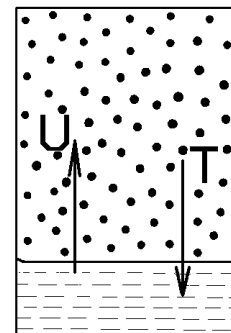
Leg uit waarom de temperatuur aan de voorzijde van de berg minder daalt dan bij droge lucht. Denk hierbij aan warmte-effecten bij faseveranderingen.



## § 3 Verzadigingsdruk

### Verzadigingsdruk bij verschillende temperaturen

De verzadigingsdruk is de druk die een verzadigde damp op de wanden uitoefent. Voor elke damp geldt dat de verzadigingsdruk toeneemt bij een verhoging van de temperatuur. Dit is makkelijk te begrijpen. In de figuur hiernaast neemt de uitstroom  $U$  van moleculen toe bij een verhoging van de temperatuur. Om bij deze hogere temperatuur opnieuw evenwicht te krijgen (uitstroom  $U$  = terugstroom  $T$ ), moeten de moleculen in de damp dichter bij elkaar zitten. Bovendien is de snelheid van deze moleculen groter (hogere temperatuur). Kortom: er zijn dus meer en heftigere botsingen van de moleculen tegen de wanden.

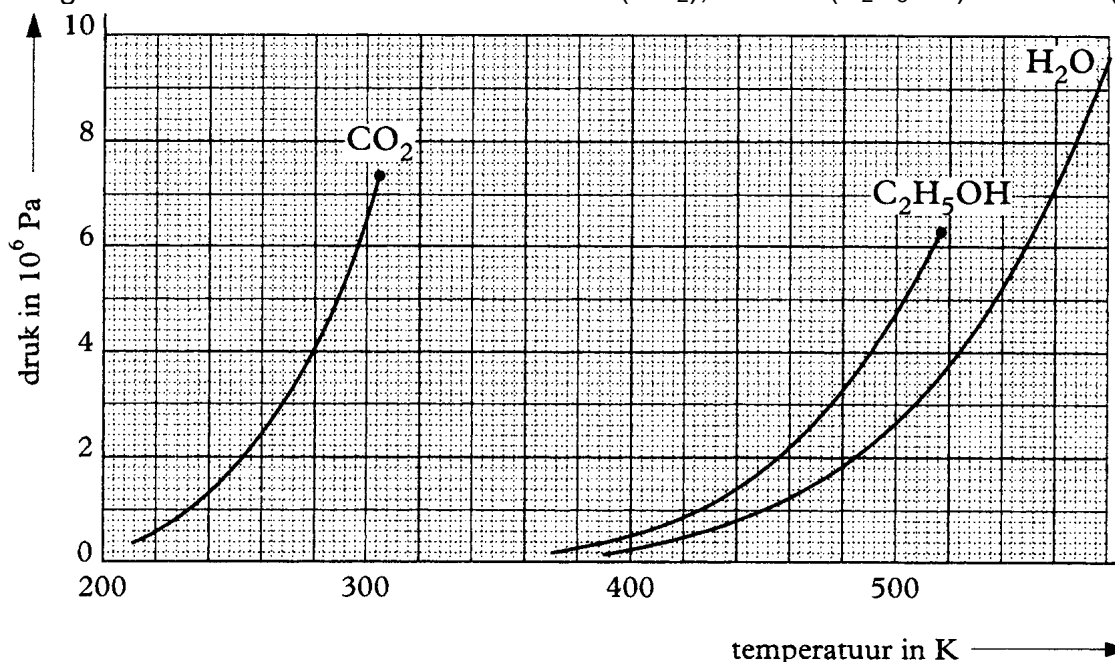


Zie bijvoorbeeld de verzadigingsdruk van water bij verschillende temperaturen in de onderstaande tabel. Deze tabel bevat zowel celsiustemperaturen als absolute temperaturen.

Temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	25	50	100	200	300	374
Temperatuur (K)	293	298	323	373	473	573	647
Verzad.druk van water (kPa)	2,34	3,17	12,3	101	1550	8590	22120

### De verzadigingsdruk tegen de temperatuur uitgezet

In het onderstaande diagram staat de verzadigingsdruk uitgezet tegen de temperatuur. Dit is gedaan voor de stoffen koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ), alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) en water ( $\text{H}_2\text{O}$ ).



De temperatuur is in graden kelvin uitgedrukt (afgekort K). De verzadigingsdruk is in megapascal uitgedrukt. Dat is een miljoen pascal en wordt kort opgeschreven als MPa of als  $10^6$  Pa.

Elk van de diagrammen heeft een eindpunt. De bijbehorende temperatuur is de kritische temperatuur. Hierop wordt later ingegaan.

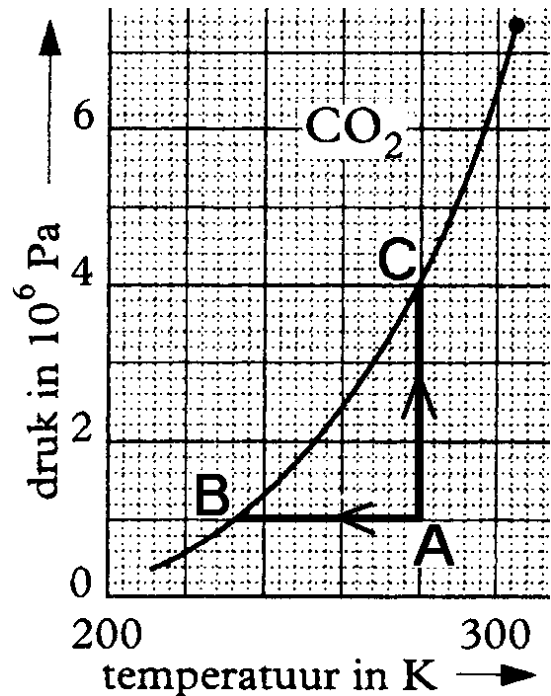
### Afkoelen en/of samenpersen van gassen

Om een gas of damp te laten condenseren kan men het gas afkoelen (= temperatuur verlagen) en/of het gas samenpersen (= druk verhogen). Condensatie treedt op vanaf het moment dat het gas de verzadigingsdruk heeft bereikt.

Stel bijvoorbeeld dat een hoeveelheid koolstofdioxide-gas een temperatuur heeft van 280 K en een druk van 1 MPa. Deze toestand wordt in de figuur hiernaast met punt A aangegeven.

Als dit gas bij gelijkblijvende druk (1 MPa) wordt afgekoeld, dan zal het gas condenseren bij een temperatuur van 232 K (punt B in de figuur).

Als dit gas echter bij gelijkblijvende temperatuur (280 K) wordt samengeperst, dan zal het gas condenseren bij een druk van 4 MPa (punt C in de figuur).



# Opgaven bij § 3

## Opgave 1

Geef de omschrijving van een verzadigde damp.

## Opgave 2

Geef de omschrijving van de verzadigingsdruk.

## Opgave 3

Hangt de verzadigingsdruk van een stof af van de temperatuur? Zo ja, hoe?

## Opgave 4

Lees in de tabel (in de tekst van deze paragraaf) af hoe groot de verzadigingsdruk van water is bij  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Opgave 5

Lees in het eerste diagram (in de tekst van deze paragraaf) af hoe groot de verzadigingsdruk van water is bij  $500\text{ K}$ .

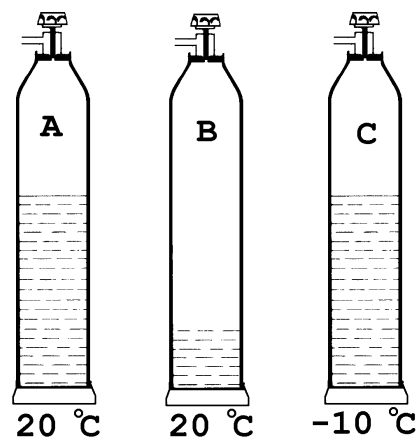
## Opgave 6

In de figuur hiernaast zijn drie brandblussers afgebeeld. Brandblussers A en B worden bewaard bij een temperatuur van  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , brandblusser C wordt bewaard bij  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Alle drie de brandblussers zijn gevuld met de stof koolstofdioxide en zijn lange tijd niet gebruikt. Zoals uit de figuur blijkt zit in blusser B veel minder vloeibaar koolstofdioxide dan in de blussers A en C.

Is de druk in blusser B kleiner dan in blusser A?

Leg je antwoord kort uit.



Is de druk in blusser C kleiner of groter dan in blusser A? Leg je antwoord kort uit.

### Opgave 7

Op welke twee manieren kun je een gas laten condenseren?

### Opgave 8

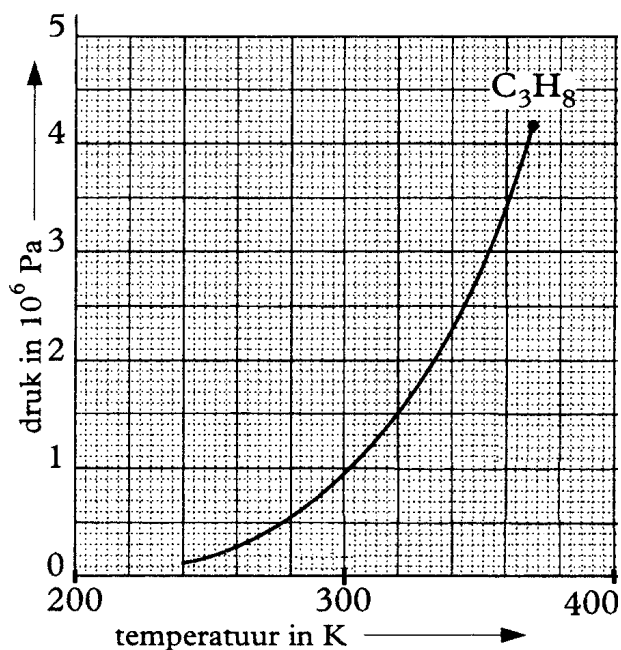
In een wegwerpaansteker zit vloeibaar butaan. Onder normale omstandigheden (bij de druk van de dampkring op zeeniveau) heeft butaan een kookpunt van  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Leg uit waarom butaan in de aansteker dan toch gewoon als vloeistof kan blijven bestaan.

### Opgave 9

In de figuur hiernaast is het verzadigingsdruk-temperatuur-diagram weergegeven van propaan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). De volgende vragen gaan over dit diagram. Propaan is bij een temperatuur van 320 K ( $= 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en een druk van 0,5 MPa een gas. Hoe kun je dat in het diagram zien?

Stel dat je propaan bij een gelijkblijvende temperatuur (van 320 K) samenperst. Lees dan in het diagram af bij welke druk propaan gaat condenseren.

Stel dat je propaan bij een gelijkblijvende druk (van 0,5 MPa) afkoelt. Lees dan in het diagram af bij welke temperatuur propaan gaat condenseren.



# § 4 Kokende vloeistoffen

## Invloed van de druk op het kookpunt

Op de top van de Mont Blanc kookt het water niet bij 100 °C maar al bij 80 °C. En op het diepste punt van een kolenmijn kookt het water pas bij 105 °C. Deze verschillen worden veroorzaakt doordat het kookpunt afhangt van de luchtdruk.

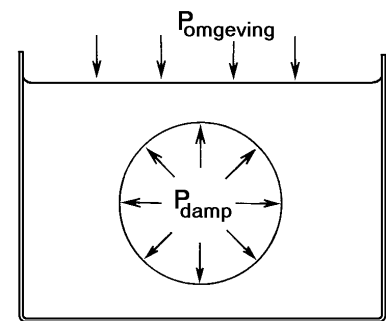
Hoe lager de luchtdruk, des te lager is het kookpunt. Zo kan water al bij 20 °C koken als de luchtdruk zeer klein gemaakt wordt (namelijk 2,3% van de luchtdruk op zeeniveau). Dit kan eenvoudig worden gedemonstreerd door een glas water in een stolp te plaatsen die wordt leeggezogen door een vacuümpomp.

Het bovenstaande heeft betrekking op water. Het geldt in principe echter voor elke stof. **Voor elke stof geldt dat het kookpunt lager wordt als de druk lager wordt.**

## Vloeistoffen die koken

De druk van de dampkring op zeeniveau bedraagt 101 kPa. We noemen dit de standaarddruk. Bij deze druk gaat water koken bij 100 °C. Uit de tabel in de voorgaande paragraaf blijkt dat de verzadigingsdruk bij 100 °C ook 101 kPa is. Dat dit geen toeval is wordt hieronder uitgelegd.

Als een vloeistof kookt vindt er verdamping plaats op plaatsen in het inwendige van de vloeistof. Er ontstaan dan dampbellen. Zie bijvoorbeeld de dampbel in de figuur hiernaast. Een dampbel kan pas ontstaan (en blijven bestaan) als de dampdruk in de bel  $P_{\text{DAMP}}$  gelijk is aan (of groter is dan) de druk die van buiten op de bel wordt uitgeoefend  $P_{\text{OMGEVING}}$ .



De druk in de bel ( $P_{\text{damp}}$ ) is gelijk aan de omgevingsdruk ( $P_{\text{omgeving}}$ ).

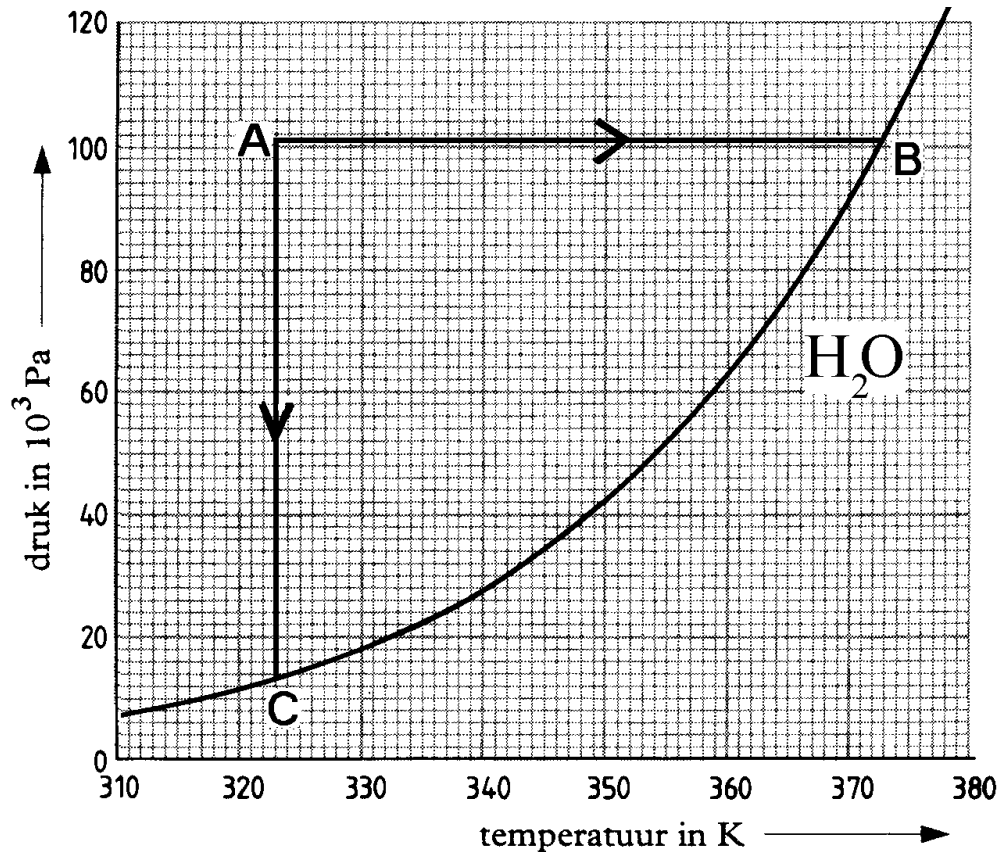
De druk van de damp in een bel is gelijk aan de verzadigingsdruk bij de heersende temperatuur. Samenvattend kunnen we dan ook het volgende zeggen.

**Een vloeistof kookt als de verzadigingsdruk gelijk is aan de omgevingsdruk.**

## Het aan de kook brengen van een vloeistof

Om een vloeistof te laten koken kan men in principe twee dingen doen: de temperatuur verhogen of de omgevingsdruk verlagen. De vloeistof gaat koken vanaf het moment dat de vloeistof de verzadigingsdruk heeft bereikt.

Stel bijvoorbeeld dat een bekglas gevuld is met een hoeveelheid water van  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (=  $323\text{ K}$ ) bij een gemiddelde druk van de dampkring op zeeniveau (=  $101\text{ kPa}$ ). Deze toestand wordt in de onderstaande figuur met punt A aangegeven. Als het water wordt verwarmd bij gelijkblijvende druk ( $101\text{ kPa}$ ), dan gaat het water bij  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  koken. In de figuur is dat met punt B aangegeven. Als de omgevingsdruk echter wordt verlaagd bij gelijkblijvende temperatuur ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), dan gaat de vloeistof koken bij  $12,3\text{ kPa}$ . In de figuur is dat met punt C aangegeven.



# Opgaven bij § 4

## Opgave 1

Een vloeistof kookt. Wat kun je zeggen over de verzadigingsdruk (bij het kookpunt) als je deze vergelijkt met de omgevingsdruk?

## Opgave 2

Een vloeistof kookt niet. Wat kun je zeggen over de verzadigingsdruk (bij de temperatuur van de vloeistof) als je deze vergelijkt met de omgevingsdruk?

## Opgave 3

Als je aardappels op de top van de Mount Everest kookt duurt het veel langer dan 20 minuten voordat de aardappels gaar zijn. Verklaar dit.

## Opgave 4

Bij een snelkookpan sluit de deksel luchtdicht op de pan. Als je aardappels in zo'n snelkookpan kookt zijn ze al na enkele minuten gaar. Verklaar dit.

## Opgave 5

Welke waarde heeft het kookpunt van water bij een omgevingsdruk van 40 kPa? Gebruik hierbij de bovenstaande grafiek. Geef je antwoord in graden kelvin en graden celsius.

## Opgave 6

Welke waarde moet de omgevingsdruk hebben om water bij 360 K te laten koken?

## Opgave 7

Welke waarde moet de omgevingsdruk hebben om koolstofdioxide bij 280 K te laten koken? Gebruik hierbij het diagram uit de voorgaande paragraaf.

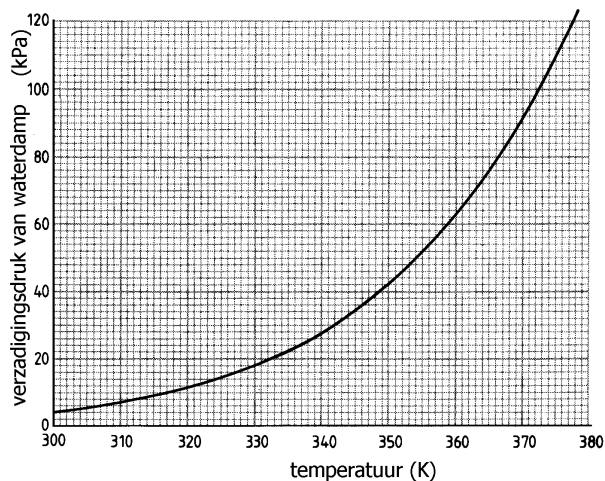
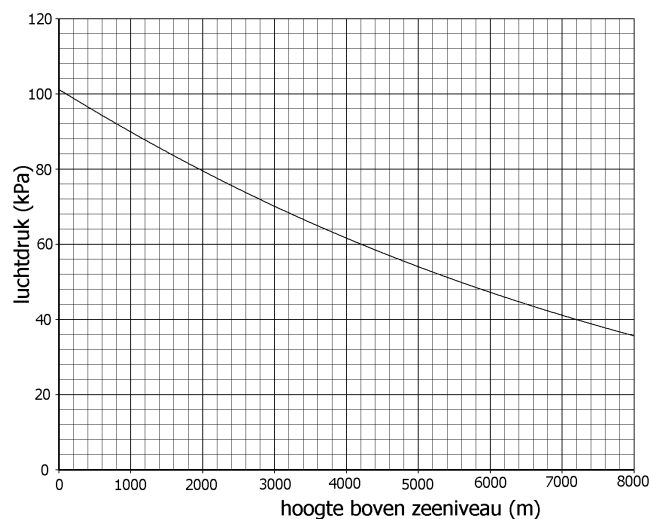
## Opgave 8

Bij welke temperatuur kookt alcohol als de omgevingsdruk  $4 \cdot 10^6$  Pa (= 4 MPa) is? Gebruik hierbij het diagram uit de voorgaande paragraaf.



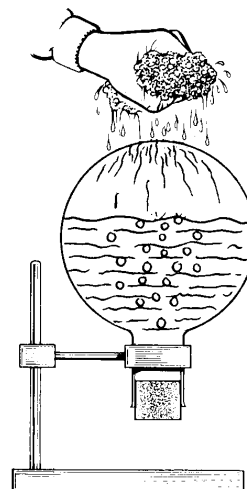
### Opgave 9

Je staat op de Zugspitze, de hoogste berg van Duitsland. Je hebt geen hoogtemeter bij je; echter wel een thermometer. Hiermee bepaal je dat het kookpunt van water op de bergtop  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  is. Leid uit de onderstaande twee diagrammen af hoe hoog de berg is.



### Opgave 10

De **proef van Franklin** gaat als volgt. Men vult een kolf voor ongeveer de helft met water. Het water wordt aan de kook gebracht met een gasvlam onder de kolf. Men laat het water een halve minuut doorkoken. De brander wordt daarna weggehaald en de kolf snel afgesloten met een kurk. Het koken stopt. Vervolgens keert men de kolf om en plaatst deze in een statief. Een spons met koud water wordt boven de kolf uitgeknepen. Zie de figuur hiernaast. Het resultaat hiervan is dat **het water weer begint te koken**. Verklaar dit resultaat.





### Opgave 11

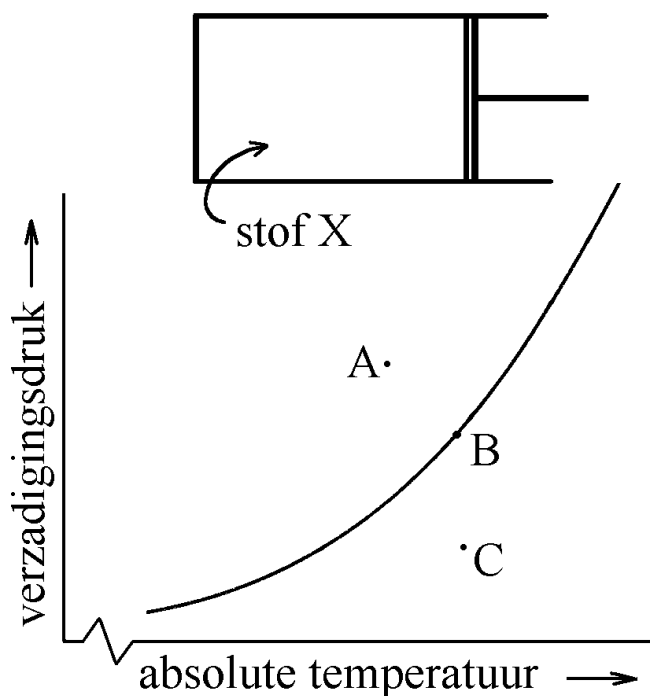
Hiernaast is een afgesloten ruimte afgebeeld die gevuld is met een hoeveelheid van stof X. Er zitten geen andere stoffen in deze ruimte. Het volume van de ruimte kan vergroot en/of verkleind worden. Onder de afgesloten ruimte is een grafiek afgebeeld waarin de verzadigingsdruk van stof X tegen de temperatuur uitgezet is.

Vul dan op de volgende open plekken A, B of C in.

In punt \_\_\_\_ is stof X een onverzadigde damp.

In punt \_\_\_\_ is stof X een vloeistof.

In punt \_\_\_\_ kan stof X gelijktijdig als vloeistof en als gas voorkomen.



# § 5 Kritische temperatuur van een stof

## Kritische temperatuur van een stof

Zoals in het voorgaande is besproken, kan men een gas laten condenseren door dit gas af te koelen of dit gas samen te persen. Toch heeft het samenpersen van een gas niet altijd condensatie tot gevolg. Elk gas heeft namelijk een temperatuur waarboven samenpersen nooit tot condensatie leidt. Deze zogenaamde 'kritische temperatuur' is van stof tot stof verschillend. Bijvoorbeeld heeft koolstofdioxide een kritische temperatuur van 31 °C. Als koolstofdioxidegas wordt samengeperst bij een constante temperatuur van bijvoorbeeld 17 °C, zal dit gas bij voldoende druk (5 MPa) gaan condenseren. Als koolstofdioxidegas echter wordt samengeperst bij een temperatuur van 45 °C, zal dit gas niet condenseren, hoe groot de druk ook wordt.

**Samengevat geldt het volgende. De kritische temperatuur van een stof is de temperatuur waarboven de stof in de gasfase niet meer tot de vloeistoffase samengeperst kan worden. Beneden de kritische temperatuur kan de stof in de vaste fase, de vloeibare fase en de gasfase voorkomen (afhankelijk van de temperatuur en de druk).**

Hieronder staat een tabel met kritische temperaturen van een aantal stoffen. Deze zijn zowel in graden celsius als in graden kelvin gegeven.

Stof	Alcohol	Koolstof-dioxide	Kwik	Stikstof	Water	Helium	Zuurstof
Krit. temp (°C)	243	31	1447	-147	374	-268	-119
Krit. temp (K)	516	304	1720	126	647	5,2	154

## Invloed van de aantrekkingskracht tussen moleculen

Bij stoffen als helium en waterstof ligt de kritische temperatuur erg laag. Dit komt omdat hun moleculen elkaar zeer weinig aantrekken. Om condensatie mogelijk te maken moeten de gassen zeer sterk worden afgekoeld. Anders gezegd: alleen bij een zeer kleine gemiddelde snelheid kunnen de moleculen aan elkaar klitten.

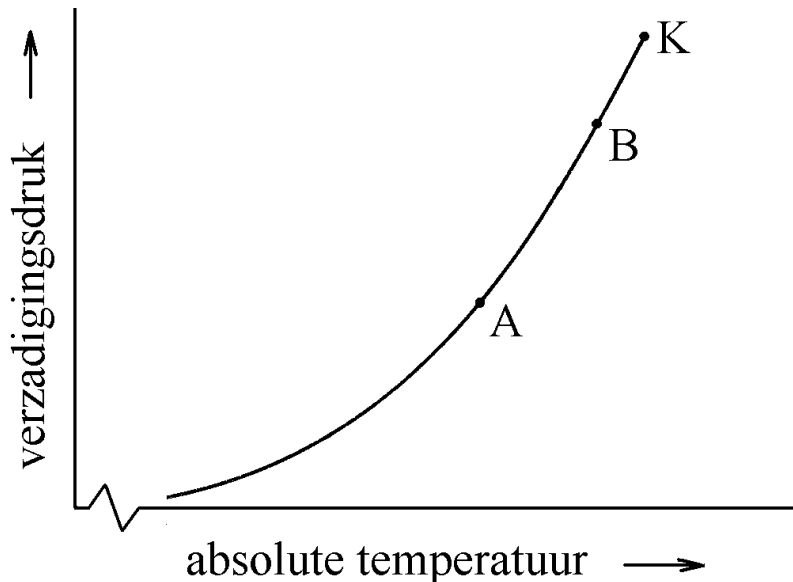
Omgekeerd is de kritische temperatuur van water en kwik hoog. Hun moleculen trekken elkaar zo sterk aan dat het aan elkaar klitten van moleculen al bij hoge temperaturen plaats vindt. Anders gezegd: zelfs als de moleculen met een hoge (gemiddelde) snelheid kriskras door de ruimte vliegen, zien de moleculen kans om aan elkaar te "kleven".

**Samengevat geldt het volgende. Als de moleculen van een stof elkaar weinig aantrekken is de kritische temperatuur van deze stof laag. Als de moleculen elkaar sterk aantrekken, is de kritische temperatuur hoog.**

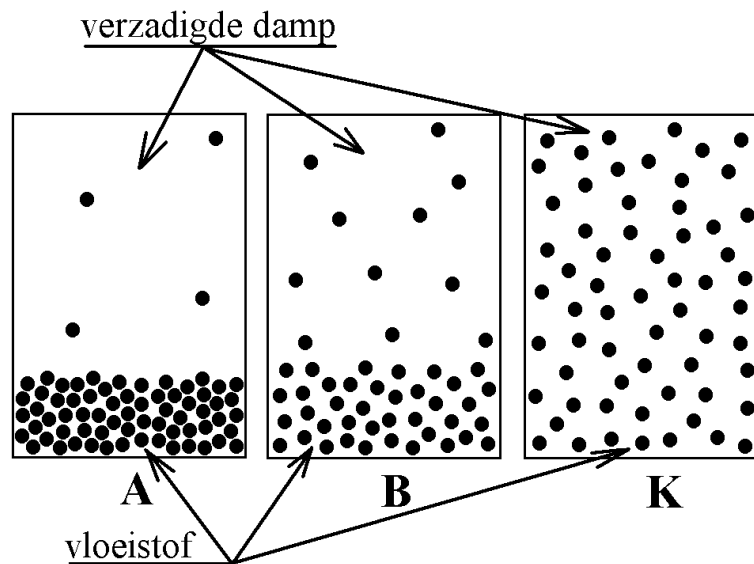
## Kritische punt als eindpunt van de verzadigingsdrukgrafiek

De gemiddelde afstand tussen de moleculen in een damp of gas is groter dan de gemiddelde afstand tussen de moleculen in een vloeistof. Dit geldt ook als de damp verzadigd is. Echter, bij temperaturen vlak onder de kritische temperatuur verschilt de molecuulafstand in de verzadigde damp niet meer zo veel van die in de vloeistof. Bij de kritische temperatuur zijn de (gemiddelde) molecuulafstand in de verzadigde damp en in de vloeistof precies gelijk aan elkaar. Er kan dan dus geen onderscheid meer gemaakt worden tussen damp en vloeistof. In het volgende wordt dit nader toegelicht.

Als je de verzadigingsdruk van een damp tegen de temperatuur uitzet, krijg je een grafiek zoals hiernaast is afgebeeld. In de grafiek zijn drie punten aangegeven: A, B en K. Punt K is het eindpunt van de grafiek en wordt het kritische punt genoemd. De bijbehorende temperatuur is de kritische temperatuur en de bijbehorende druk is de kritische druk.



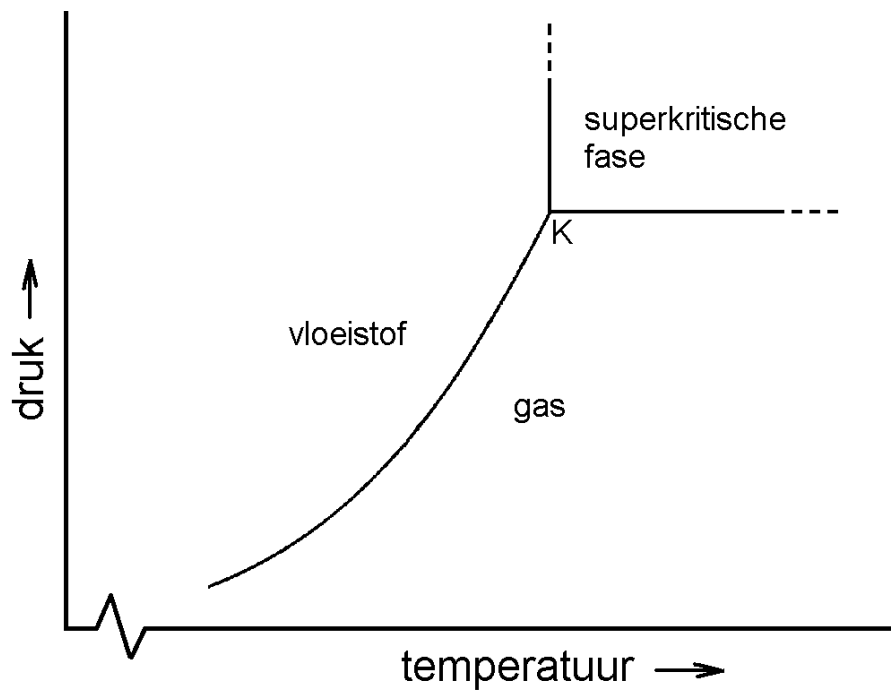
De drie figuren onder de grafiek geven de toestand van de moleculen in een afgesloten ruimte weer in de punten A, B en K. Uit deze figuren blijkt het volgende. Als de temperatuur hoger wordt, wordt de afstand tussen de vloeistofmoleculen groter en de afstand tussen de dampmoleculen juist kleiner. Bij de kritische temperatuur (punt K) is de afstand tussen de vloeistofmoleculen gelijk aan de afstand tussen de dampmoleculen.



**Samengevat geldt het volgende. Als de temperatuur stijgt en hierbij de kritische temperatuur nadert, dan 'groeien' de eigenschappen van de verzadigde damp en die van de vloeistof naar elkaar toe. Bij en boven de kritische temperatuur kan er geen onderscheid meer gemaakt worden tussen damp en vloeistof.**

## Superkritische fase

Een stof, zoals koolstofdioxide of water, waarvan de temperatuur boven de kritische temperatuur en de druk boven de kritische druk ligt, wordt 'superkritisch' genoemd. Je zou de superkritische fase van de stof als de vierde fase kunnen beschouwen naast de vaste fase, vloeibare fase en gasfase. Zie de figuur hiernaast waarin de druk tegen de temperatuur is uitgezet. De kromme lijn geeft de verzadigingsdruk van de stof weer met punt K als kritische punt.



Een stof in de superkritische fase heeft eigenschappen van zowel een gas als een vloeistof. Zo is een superkritische stof in staat om door veel stoffen heen te dringen, net zoals een gas dat kan. Aan de andere kant kan een superkritische stof ook stoffen oplossen zoals een vloeistof dat kan. Neem bijvoorbeeld superkritisch koolstofdioxide. Hiermee kan men uit koffiebonen de stof cafeïne verwijderen. Het koolstofdioxide dringt door tot in de koffiebonen en lost de cafeïne daarbij op.

# Opgaven bij § 5

## Opgave 1

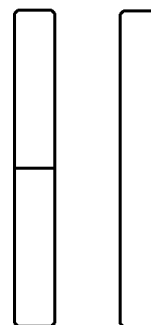
Geef de omschrijving van de kritische temperatuur van een stof.

## Opgave 2

Hoe beïnvloedt de aantrekkingskracht tussen de moleculen de kritische temperatuur?

## Opgave 3

Een afgesloten glazen buisje is gevuld met een hoeveelheid koolstofdioxide. De onderste helft van de inhoud is vloeibaar, de bovenste helft is damp. Zie het linker buisje in de figuur hiernaast. Als je het buisje enige tijd met je handen verwarmt, verdwijnt het scheidingsvlak tussen de vloeistof en de damp. Zie het rechter buisje in de figuur hiernaast. Leg uit hoe dat komt.



## Opgave 4

Marieke en Iris zijn lid van een duikvereniging. Deze vereniging vult de duikflessen van haar leden met samengeperste lucht. Deze lucht bestaat voor 80% uit stikstof en voor 20% uit zuurstof.

Nu hebben Marieke en Iris een meningsverschil. Marieke beweert dat de gevulde cilinders vloeibare lucht bevatten. Iris beweert dat de lucht in gasvorm blijft.

Wie heeft gelijk? Licht je keuze hieronder toe.

## Opgave 5

Wetenschappers vermoeden dat het op Titan, één van de manen van Saturnus, methaan kan regenen. Methaan is een bestanddeel van aardgas en heeft een kritische temperatuur van 191 K. Stel dat er inderdaad methaanregens op Titan bestaan. Wat kun je dan zeggen over de temperatuur van de atmosfeer van Titan? Licht je antwoord toe.

### Opgave 6

Veel brandblussers bevatten samengeperst koolstofdioxide.

Jan beweert dat als je met de brandblusser gaat schudden, je geklots hoort.

Piet beweert dat je dan geen geklots hoort.

Geef een argument voor Jans bewering.

Geef een argument voor Piets bewering.

### Opgave 7

Leg met moleculen uit waarom een verzadigde damp en een vloeistof veel op elkaar lijken als de temperatuur vlak onder de kritische temperatuur ligt.

### Opgave 8

Het edelgas xenon heeft een kritische temperatuur van  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een kritische druk van 58 bar. In welke van de volgende situaties is xenon superkritisch?

- A. Bij een temperatuur van  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een druk van 30 bar.
- B. Bij een temperatuur van  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een druk van 30 bar.
- C. Bij een temperatuur van  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een druk van 90 bar.
- D. Bij een temperatuur van  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een druk van 90 bar.

### Opgave 9

Bij het chemisch reinigen van kleding kan men onder andere superkritisch koolstofdioxide gebruiken. Leg uit waarom dit als reinigingsmiddel geschikt is.