

MEETNAUWKEURIGHEID

1 Wat we al weten over meten

Om fysische verschijnselen te begrijpen en te verklaren met wiskundige modellen heb je in het derde jaar nauwkeurig leren meten. Door het meten van een lengte (l) in meter (m); een massa (m) in kilogram (kg); een tijd (t) in seconde (s) en een temperatuur (t_c) in graden Celsius ($^{\circ}\text{C}$) kon je fysische verschijnselen meten en formules op hun juistheid verifiëren.

Je hebt lengtes gemeten met een meetlat, met een schuifmaat met nonius en met een schroefmaat.

Je hebt de massa gemeten met een balans, de tijd met een chronometer en de temperatuur met een thermometer.

De nauwkeurigheid waarmee je gemeten hebt hangt in de eerste plaats af van het meettoestel zelf. Het meten van een lengte zal nauwkeuriger zijn als je een schroefmaat gebruikt.

Het is uiteraard de bedoeling bij het meten geen fouten te maken. Foutieve aflezingen en verkeerde instellingen van meettoestellen zijn te vermijden. Het meten van een willekeurige grootte geeft echter al een fout, want je kan niet nauwkeuriger meten dan de kleinste aanduiding op het meettoestel. Dit laatste is op te lossen door bij elke meting de fout te vermelden.

Je weet beslist nog dat elk meettoestel een kleinste mogelijke verdeling heeft. Deze kleinste verdeling noemen we de absolute fout. Je kan ze dus gemakkelijk op het meettoestel zelf aflezen.

Enkele voorbeelden maken dit duidelijk:

- een thermometer heeft een fout van $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- een maatcilinder heeft een fout van 5 ml
- een chronometer heeft een fout van $0,1\text{ s}$
- een balans heeft een fout van $0,1\text{ g}$

Dit betekent dat, als je een meting uitvoert, je altijd met die fout rekening moet houden.

Je bekomt $t = 23,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ als waarde voor een temperatuur die gemeten is met een thermometer met absolute fout $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je kunt dan schrijven:

$$t = (23,2 \pm 0,1)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Dit betekent dat de werkelijke temperatuur begrepen is tussen $23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Te onthouden

- Een lengte l wordt gemeten in meter, een massa m in kilogram, een tijd t in seconden en een temperatuur t_c in graden Celsius.
- Bij elke meting is er een absolute fout. Die kun je vinden door de kleinste verdeling van het meettoestel te noteren.

2 Meten met meerdere meettoestellen

Het is duidelijk dat elk meettoestel zijn eigen absolute fout heeft. Gebruiken we nu voor een meting twee of meer meettoestellen, wat zal dan de fout zijn op het resultaat?

Een voorbeeld maakt het duidelijk.

Veronderstel dat je de massadichtheid van een vaste stof wilt bepalen. De formule voor massadichtheid is $\rho = m/V$.

Je bepaalt de massa van de vaste stof met een balans die een nauwkeurigheid heeft van 0,1 g. Je vindt $m = 25,2$ g

Je meet het volume van de vaste stof. Daarvoor doe je het volgende. Je neemt een maatcilinder met een nauwkeurigheid van 1 ml (1 cm^3). Je brengt een willekeurige hoeveelheid water in de maatcilinder, je leest het volume V_1 af. Je brengt dan de vaste stof in de maatcilinder en je leest het volume V_2 af. Het volume van de vaste stof is dan $V = V_2 - V_1$. Je vindt dan $V = 34$ ml. ($= 34 \text{ cm}^3$)

Hoe moet je nu de fout van zo'n onrechtstreekse meting bepalen?

In de massa staan 3 beduidende cijfers, in het volume 2 beduidende cijfers, dit betekent dat het resultaat van de deling 2 beduidende cijfers mag hebben.

$$\rho = 25,2 / 34 = 0,74117 \text{ g/cm}^3$$

Je rondt dit echter af tot op 2 beduidende cijfers nl. $\rho = 0,74 \text{ g/cm}^3$.

Je onthoudt dat de minst nauwkeurige meting de nauwkeurigheid het eindresultaat bepaalt.

Bij een onrechtstreekse meting kan het berekend resultaat slechts evenveel beduidende cijfers als het meetresultaat met het kleinste aantal beduidende cijfers.

Je kunt vaststellen dat bovenstaande meting niet erg nauwkeurig uitgevoerd is.

Met deze eenvoudige benaderingsregels kun je nu de fout bepalen van alle metingen die je zult uitvoeren. Je past dat in het vervolg altijd toe bij het berekenen van resultaten.

Hoewel je bij elke meting een meetfout maakt, blijft de uitkomst van de meting aanvaardbaar, van zodra je een idee hebt van de gemaakte fout.

Te onthouden

- De minst nauwkeurige meting bepaalt de nauwkeurigheid van het meetresultaat.
- Bij een onrechtstreekse meting mag het berekend resultaat slechts evenveel beduidende cijfers tellen als het meetresultaat met het kleinste aantal beduidende cijfers.

3 Over grafieken

Je kan de meetresultaten in een grafiek of diagram uitzetten.

Je neemt een beker met water op kamertemperatuur en je verwarmt lichtjes.

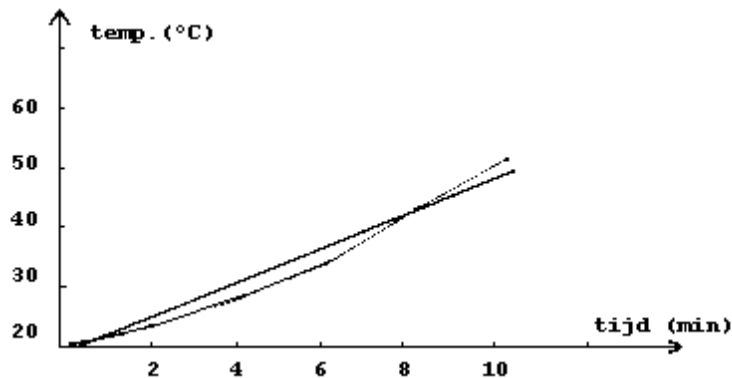
Je leest om de twee minuten de temperatuur af tot je bv. aan 50 °C bent. Je maakt een tabel van de meetresultaten.

Die zien er bv. als volgt uit:

Tijd (min)	Temperatuur (°C)
0	20
2	23
4	27
6	35
8	44
10	52

Je zet deze gegevens uit in een temperatuur(tijd)-diagram. De onafhankelijk veranderlijke is hier de tijd en de afhankelijk veranderlijke de temperatuur.

Je plaatst de tijd op de horizontale as en de temperatuur op de verticale as. Je mag niet vergeten de eenheden tussen haakjes erbij te voegen. De meetpunten ga je verbinden met rechte lijnen.



Indien mogelijk, afhankelijk van de wiskundige functie teken je ook de trend van de metingen. De trend is de theoretische lijn of kromme. Merk op dat je geen verbindingen maakt buiten de meetpunten.

Te onthouden

- Een grafiek geeft grafisch het resultaat van de meting.
- De trend is de wiskundige kromme die het experimenteel resultaat het best benadert.

4 Vragen en opgaven

1 Zet om in de geschikte eenheden

$$0,1 \text{ kg} = \dots \text{ g}$$

$$100 \text{ cm} = \dots \text{ dam}$$

1 h 12 min 18 s = ... s

$$1200 \text{ cg} = \dots \text{ hg}$$

$$210 \text{ mm} = \dots \text{ dm}$$

2 Geef telkens het aantal beduidende cijfers en de meetnauwkeurigheid:

432 cm; 432,0 cm; $38 \cdot 10^3$ g; 38000 g; 0,345 ml.

3 Bereken de omtrek en de oppervlakte van een cirkel met straal 10 cm. Hou bij het geven van de uitkomst rekening met de beduidende cijfers. Geef ook de meetnauwkeurigheid bij de resultaten.

4 Een koperen bol heeft een massadichtheid van $8,92 \text{ g/cm}^3$ en een straal van 2,6 cm. Bereken zijn volume en zijn massa. Bepaal de diameter van een knikker als je weet dat zijn massa 34,5 g is en zijn massadichtheid $6,2 \text{ g/cm}^3$ is.

5 Teken een $k(l)$ -grafiek waarbij je weet dat als k stijgt, dan l moet dalen. (k en l zijn twee grootheden die veranderen tussen 1 en 4).

6 Maak een $v(t)$ -grafiek uitgaande van de onderstaande meetresultaten

t(s)	v(km/h)
1	12
2	22
3	34
4	45
5	56
6	71
7	82
8	96

Teken nu ook de trend. Welk verband kun je vermoedelijk vaststellen tussen v en t ?
Heb je enig idee hoe men uit de grafiek de meetnauwkeurigheid zou kunnen afleiden?

TE ONTHOUDEN OVER MEETNAUWKEURIGHEID

- Wat is meten?

Een lengte l wordt gemeten in meter (m), een massa m in kilogram (kg), een tijd t in seconde (s) en een temperatuur t_c in graden Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Bij elke meting is er een absolute fout. Die kun je vinden door de kleinste verdeling van het meettoestel te noteren.

- Meten met meerdere toestellen

De minst nauwkeurige meting bepaalt de nauwkeurigheid van het meetresultaat. Bij een onrechtstreekse meting mag het berekend resultaat slechts evenveel beduidende cijfers tellen als het meetresultaat met het kleinste aantal beduidende cijfers.

- Over grafieken

Een grafiek geeft grafisch het resultaat van de meting. De trend is de wiskundige kromme die het experimenteel resultaat het best benadert.

DRUK

1 DRUK OP VASTE STOFFEN

'Druk'... voor velen onder ons is het synoniem voor 'kracht'. Niets is minder waar. Enkele voorbeelden zullen ons op het goede spoor zetten om het antwoord te vinden op de vraag 'wat is druk?'.

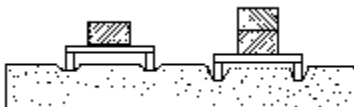
1.1 Voorbeelden

- Een man en een vrouw hebben dezelfde massa. Ze kuieren samen op het strand. De man heeft platte schoenen aan, de vrouw draagt hoge hakken. Je ziet dat de voetstappen van de vrouw de diepste indrukken nalaten in het zand.
- Je vriend of vriendin valt door een wak (zwakke plek in het ijs) tijdens het schaatsen. Door er in paniek naar toe te rennen kan je er op rekenen dat je hetzelfde lot zult ondergaan. Je kunt hem of haar echter wel redden door bijvoorbeeld plat op je buik te gaan liggen en hem of haar zo uit het water te trekken.
- Je vader wil in de tuin een afsluiting met houten paaltjes plaatsen om de hond binnen te houden. De paaltjes zijn onderaan voorzien van een scherpe punt om ze gemakkelijker in de grond te kunnen heien. Is dat niet het geval dan is het goed mogelijk dat je vader in het ziekenhuis belandt omdat hij zich een 'breuk' gewerkt heeft.
- Bij het parkeren op een modderbaantje nabij het vliegveld is jullie auto vastgeraakt. De wielen blijven ronddraaien. Door een houten plank of de reserveband onder de wielen te schuiven kan je er voor zorgen dat de wielen weer 'grip' krijgen op de baan.

Om het verschil tussen druk en kracht helemaal duidelijk te maken voeren we nog een proef uit.

PROEF

We leggen een baksteen op een stuk schuimrubber en bekijken de diepte van de indrukken. Daarna herhalen we de proef met twee bakstenen. Opnieuw observeren we de vervorming.



Waarneming

De twee bakstenen (op elkaar) veroorzaken een grotere vervorming.

Besluit

Uit alle aangehaalde voorbeelden en uit de proef blijkt duidelijk dat de vervorming onafhankelijk is van de uitgeoefende kracht en het oppervlak, waarop de kracht uitgeoefend wordt.

Schematisch

- Een kracht veroorzaakt een vervorming van een vaste stof. Hoe groter de uitgeoefende kracht hoe groter de vervorming.
- Is het oppervlak, waarop de kracht uitgeoefend wordt, klein dan is de vervorming groot.
- Is het oppervlak, waarop de kracht uitgeoefend wordt groot, dan is de vervorming klein.

1.2 Wat is druk?

Om het vervormend effect van een kracht wetenschappelijk te kunnen beoordelen moeten we een nieuw begrip 'druk' invoeren. Druk is de verhouding van de grootte van de uitgeoefende kracht tot de oppervlakte. De kracht moet loodrecht uitgeoefend worden op het oppervlak. Wanneer we druk symboliseren door 'p', kracht door 'F' en oppervlakte door 'A', kunnen we de bovenstaande definitie ook in een formule gieten.

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

De eenheid voor druk vinden we door uit te gaan van de formule. Kracht wordt uitgedrukt in Newton (N) en oppervlakte in m². De eenheid voor druk is dus 1 N/m². Ze krijgt een speciale naam. We noemen ze Pascal (afgekort Pa). Een Pascal is dus de druk die uitgeoefend wordt door een kracht van 1 Newton, die loodrecht inwerkt op een oppervlakte van 1 vierkante meter.

Toepassingen

We kunnen tal van voorbeelden aanhalen, waarbij het de bedoeling is om hogedrukken te bekomen:

- spijkers hebben scherpe punten
- vorken bezitten nog maar liefst 4 scherpe punten en messen zijn uitgerust met een min of meer scherpe snijkant
- allerlei werktuigen zoals scharen, beitels... hebben telkens scherpe punten of vlakken zodat de uitgeoefende druk erg groot wordt.

In andere gevallen is het de opzet om de druk te verminderen:

- zo maken we gebruik van ski's of sneeuwschoenen om ons over de sneeuw te verplaatsen
- tanks en kranen die door de modder moeten rijden worden voorzien van rupsbanden
- een schaliedekker gebruikt een ladder om op de pannen te leggen zodat ze niet breken wanneer hij erop loopt.

Schematisch

- Druk geeft de verhouding van de grootte van de uitgeoefende kracht tot de oppervlakte, op voorwaarde dat de kracht loodrecht uitgeoefend wordt op het oppervlak. In formule wordt dit: $p = F / A$
- De eenheid voor druk is Pascal (Pa). Het is de druk die uitgeoefend wordt door een kracht van 1 Newton, die loodrecht inwerkt op een oppervlakte van 1 vierkante meter.

1.3 Materiaalspanning

Druk op vaste stoffen zal dus in het algemeen resulteren in een vervorming van die vaste stof. Toch blijft de vervorming gering. Hoe komt dat?

In die vaste stof zijn ook krachten werkzaam. De cohesiekrachten namelijk (= krachten tussen dezelfde moleculen) houden de vaste stof samen en zijn erg groot. In plaats van samen te drukken kunnen we het ook uitrekken.

Door die uitwendige kracht ontstaat er binnen in de stof een spanning die we materiaalspanning noemen.

Naargelang er druk of trek uitgeoefend wordt, spreken we van drukspanning of trekspanning.

Meestal is de vervorming bij vaste stoffen niet groot maar als de materiaalspanning te groot is, treedt er breuk op. Ontwerpers van constructies en gebouwen moeten dus terdege rekening houden met de toegelaten spanning voor verschillende materialen.

Voorbeeld

Bruggen worden in allerlei vormen gebouwd. Een van de bekende vormen is de hangbrug.

Het wegdek is opgehangen aan kabels. In die kabels werkt dus een zeer grote trekspanning. Stalen kabels kunnen een maximale trekspanning van $1500 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ weerstaan.

De kabels met rijbaan worden gedragen door betonnen torens. Binnen het beton (vooral onderaan) werkt een grote drukspanning. Beton kan een maximale drukspanning van $40 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ verdragen zonder te verpulveren. Beton kan echter geen grote trekspanning verdragen: maximaal $4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Daarom zijn betonnen liggers gewapend met staaldraad.

Schematisch

- Druk op vaste stoffen resulteert in een vervorming van die vaste stof.
- Door die uitwendige kracht ontstaat in de vaste stof een spanning die we materiaalspanning noemen. We maken daarbij onderscheid tussen drukspanning en trekspanning. De materiaalspanning is het gevolg van de cohesiekrachten in een vaste stof.

1.4 Vragen en opgaven

1 Waarom leggen we een plank over een pas gelegde vloer als we er willen op lopen?

2 Een persoon van 50 kg staat op twee schoenen met elk een oppervlakte van 120 cm^2 . Bereken de uitgeoefende druk. Als die persoon op ski's staat met een oppervlakte van elk 820 cm^2 , hoe groot wordt de druk dan?

3 Wie zal het parket het meest beschadigen: een dame van 50 kg op twee naaldhakken van elk $1,10 \text{ cm}^2$ of een olifant van 3,5 ton met vier poten van elk $8,8 \text{ dm}^2$?

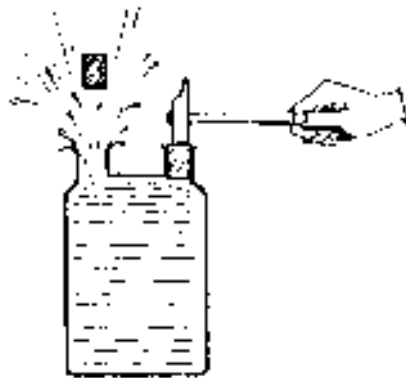
2 DRUK OP EN IN VLOEISTOFFEN

2.1 Hoe verspreidt druk zich in een vloeistof?

In vaste stoffen verspreidt de druk zich in de richting waarin men de kracht uitoefent. Alle voorbeelden en de proef uit het eerste hoofdstuk tonen dit aan. Maar hoe is dat voor vloeistoffen?

PROEF

Een tweehalzige Woulfse fles wordt tot boven toe gevuld met water. De beide openingen worden afgesloten met kurken zodat de kurken het wateroppervlak niet raken. Met de vuist geven we een korte slag op een van de kurken.



Waarneming

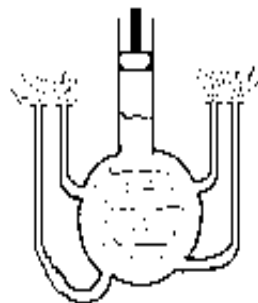
De andere kurk 'springt' uit de fles.

Besluit

Wanneer we een druk uitoefenen op een vloeistof, dan verspreidt die druk zich door de vloeistof.

PROEF

Een kolfje is over het ganse oppervlak doorboord. In de lange hals kan een zuiger bewegen. Het kolfje wordt volledig gevuld met water. Daarna drukken we de zuiger naar beneden.



Waarneming

Het water spuit langs alle kanten uit de kolf.

Besluit

Een druk, uitgeoefend op een deel van de vloeistof, verspreidt zich in die vloeistof in alle richtingen.

Schematisch

Wanneer we een druk uitoefenen op een vloeistof geldt de wet van Pascal: de druk die op een bepaald deel van een vloeistof wordt uitgeoefend, verspreidt zich in die vloeistof in alle richtingen en met dezelfde intensiteit.

2.2 Voorbeelden van druk op vloeistoffen

In de waterleiding is de druk van het water ongeveer 300000 Pa. Hij wordt veroorzaakt doordat het waterreservoir zich in een watertoren bevindt.

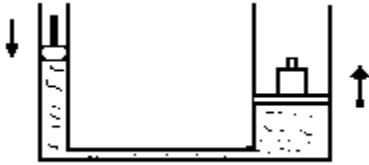
In aders en slagaders varieert de grootte van de druk van 1000 Pa tot 10000 Pa. De pompende werking van het hart is hier de oorzaak van de druk op de wanden van de aders.

In het drukvat van de centrale verwarming is de druk van het water ongeveer 500000 Pa.

In de hydraulische rem is de druk van de olie om en nabij 1000000 Pa. De druk, die daardoor op de remschijven uitgeoefend wordt, is voldoende groot om een auto te laten stoppen.

2.3 De hydraulische pers

Dit is een werktuig dat steunt op de wet van Pascal. Men oefent een kleine kracht uit op een klein oppervlak, de vloeistof verplaatst zich naar de grote zuiger die op een groot oppervlak werkt. Met een kleine kracht kan men een grote kracht uitoefenen.



Het gewicht van de linkse waterkolom is:

$$F = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \quad (\text{want } \rho = m / V)$$

Het gewicht van de rechtse waterkolom is:

$$F' = m' \cdot g = \rho \cdot V' \cdot g = \rho \cdot A' \cdot h \cdot g$$

Daar de druk $p = p'$ volgt hieruit dat:

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

Merk op dat bij zuigers meestal de diameter d gegeven wordt. Daar nu $A = \pi d^2 / 4$ volgt hieruit dat bovenstaande formule ook kan geschreven worden als:

$$\frac{F}{d^2} = \frac{F'}{d'^2}$$

2.4 Toepassingen van de hydraulische pers

- hydraulische rem (vloeistof = olie)
- hydraulische lift
- perswagens
- de Eiffeltoren rust op grote zuigers van 16 persen met 30 m^2 oppervlakte, terwijl de kleine zuigers slechts 300 cm^2 oppervlakte hebben, dit om de invloed van de windstoten op te vangen!!

2.5 Een uitgewerkt voorbeeld

Men wil met een hydraulische pers een massa van 5000 kg optillen d.m.v. een kracht van 50 N. De zuiger waarop de kracht van 50 N inwerkt heeft een oppervlakte van 10 cm². Hoe groot is de oppervlakte van de andere zuiger?

$$m' = 5000 \text{ kg of } F' = m \cdot g = 49000 \text{ N}$$

A'?

Uit $F/A = F'/A'$ halen we

$$A' = A \cdot F' / F = 10 \cdot 49000 / 50 = 9800 \text{ cm}^2 = 0,980 \text{ m}^2$$

2.6 Vragen en opgaven

1 Waarom duurt het veel langer om een wagen met een hydraulische krik omhoog te brengen dan om hem neer te laten?

2 De oppervlakte van een kleine zuiger van een hydraulische pers is 12 cm². De grote zuiger heeft een oppervlakte van 250 cm². Hoe groot is de persdruk, wanneer op de kleine zuiger een kracht van 360 N wordt uitgeoefend? Bereken ook de perskracht.

3 Een hydraulische pers moet een perskracht van 13000 N uitoefenen. De grote zuiger heeft een oppervlakte van 800 cm². Hoe groot moet de oppervlakte van de kleine zuiger zijn wanneer op deze zuiger een kracht van 650 N wordt uitgeoefend.

4 Bereken de verhouding van de hefboomarmen van een hydraulische pers, die een totale perskracht van 20000 N kan uitoefenen, als de grote zuiger een diameter heeft van 50 cm, de kleine zuiger een van 5 cm en de kracht, die aan het uiteinde van de hefboom werkt 50 N is.

5 Een autokrik moet 1,80 ton lichten. De diameter van de kleine zuiger is 2,0 cm, die van de grote zuiger 12,0 cm. Welke kracht moet men op de kleine zuiger uitoefenen?

2.7 Druk in een vloeistof: hydrostatische druk

Ook als er geen druk uitgeoefend wordt op een vloeistof, bestaat er toch een druk in die vloeistof. Een paar voorbeelden tonen dat aan:

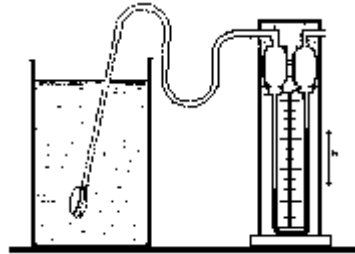
- als je in een zwembad duikt, voel je meer druk in je oren naarmate je dieper gaat

- een duikboot die te diep in het water duikt loopt gevaar samengedrukt te worden. Voor diepzeeduiken gebruikt men daarom bathyscafen, dit zijn speciale onderzeeërs met zeer dikke wanden.

De druk die in een vloeistof heerst, noemen we de hydrostatische druk.

PROEF

We vullen een hoge kom met water. We dompelen er een vliesmanometer in en bewegen hem in een horizontaal vlak. Daarna steken we de manometer dieper in het water.



Waarneming

Er heerst een druk in het water. In een horizontaal vlak blijft de hydrostatische druk gelijk. Naarmate we dieper in het water gaan, wordt hij groter.

PROEF

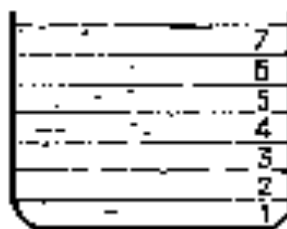
We herhalen de proef, maar nu vullen we de kom met norvanol (mengsel van ethanol, water en ether).

Waarneming

De hydrostatische druk is kleiner dan bij water.

Hoe kan je de hydrostatische druk verklaren?

In onze verbeelding verdelen we een bepaalde watermassa in verschillende, op elkaar liggende laagjes. De watermassa is in rust. Een laagje oefent door zijn gewicht een druk uit op de onderliggende laagjes en ondergaat op zijn beurt een druk vanwege het gewicht van de bovenliggende laagjes. De hydrostatische druk neemt dus toe met de diepte en is het grootst in het onderste laagje.



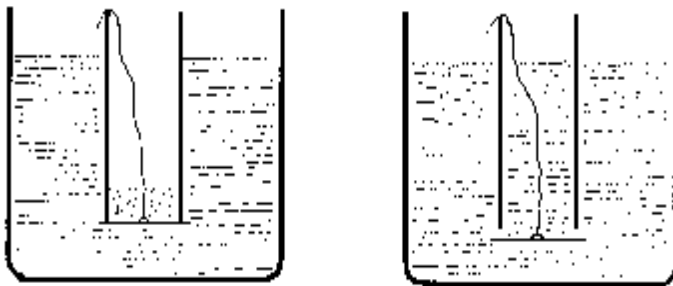
Schematisch

- De druk, die in een vloeistof heerst, noemen we de hydrostatische druk.
- De hydrostatische druk is dezelfde in alle punten van een horizontaal vlak.
- Hij neemt toe met de diepte.
- De hydrostatische druk is afhankelijk van de aard van de vloeistof.

2.8 Hoe groot is de hydrostatische druk?

PROEF

Een cilindervormige glazen buis sluiten we af met een los plaatje. We brengen de buis met het plaatje in een beker gevuld met water. We zien dat het plaatje als het ware aan de buis 'kleeft'. We spuiten nu water in de buis.



Waarneming

Het plaatje komt los van de buis op het moment dat het vloeistofniveau in de buis gelijk is aan die er rond.

Besluit

Op het ogenblik dat het plaatje loskomt is de hydrostatische druk op het plaatje, uitgeoefend door de vloeistof in de beker, even groot als de druk die uitgeoefend wordt door de vloeistof in de buis.

Om de grootte van de hydrostatische druk te berekenen, maken we gebruik van de volgende gekende formules:

$$F = m \cdot g$$

$$m = \rho \cdot V$$

Bovendien kunnen we het volume van de waterzuil vinden door de formule: $V = A \cdot h$

waarbij A de oppervlakte van het grondvlak is en h de hoogte.

Uit deze drie formules volgt er dat:

$$F = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$$

Vermits $p = F/A$ volgt hieruit dat:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

De verschillende grootheden worden in de volgende eenheden genoteerd

p : druk in Pa

ρ : massadichtheid van de vloeistof in kg/m^3

h : de diepte of hoogte van de vloeistof, uitgedrukt in m

g : de veldsterkte, gelijk aan 9.8 N/kg .

2.9 Gevolgen en toepassingen van hydrostatische druk

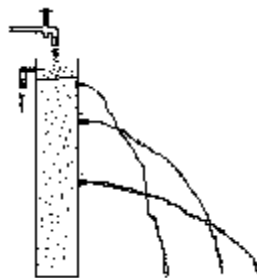
- De vorm van dijken en stuwdammen is berekend op de toename van de hydrostatische druk met de diepte. Dijken en stuwdammen zijn breed onderaan en smal bovenaan.

- Als je met de auto in het kanaal terechtkomt, kan je onder water een deur maar openen als de druk aan beide zijden gelijk is. Je moet dus de ramen opendraaien zodat het water kan binnenstromen.

- Een vat gevuld met water dat plat op een wagentje ligt kan het wagentje voortduwen als we de stop uit de fles trekken.
Kan je de verklaring vinden? Toegegeven, dit is een stevig doordenkertje.

PROEF

Een vat met een aantal openingen wordt gevuld met water. De waterstraal is krachtiger als de opening lager is.



Dit is logisch want de hydrostatische druk neemt toe met de diepte. We stellen vast dat de vloeistofstraal loodrecht op de wand staat.

Wat gebeurt er dan bij een schuine wand?

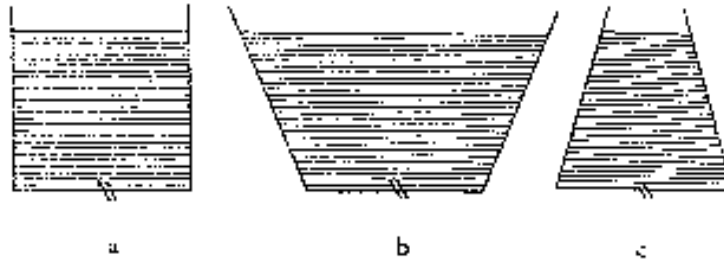
We nemen voor de hoogte de hoogte van het zwaartepunt van die wand tot het vloeistofoppervlak.

$$F = \rho \cdot g \cdot h \cdot A$$

met h = afstand van het zwaartepunt Z_p tot de vloeistofspiegel.

PROEF

Deze proef noemt men de hydrostatische paradox.



Vullen we de drie vaten tot op dezelfde hoogte (hun oppervlak is ook gelijk), dan stellen we vast dat de hydrostatische druk en kracht in de drie vaten dezelfde zijn en nochtans vinden we verschillende gewichten.

Hoe kunnen we dan vloeistoffen in vaten wegen?

Blijkbaar is de kracht die door een vloeistof op de bodem van het vat wordt uitgeoefend onafhankelijk van de vorm van het vat en blijft dezelfde als bij dezelfde bodem dezelfde vloeistof tot op gelijke hoogte komt. Deze schijnbare tegenstrijdigheid kan met de bijkomende kracht F' opgelost worden.

2.10 Vragen en opgaven

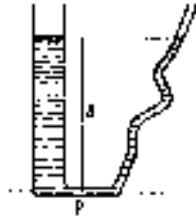
- 1 Hangt de kracht op een sluisdeur af van de lengte van het kanaaldeel er achter?
- 2 Is de kracht op de beide zijden van een sluisdeur even groot als het water aan de twee kanten even hoog staat?
- 3 Bereken de hydrostatische druk op 5 km diepte in zeewater ($\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$).
- 4 Een bak, 1 m lang, 75 cm breed en 60 cm hoog is voor $2/3$ gevuld met water. Bereken de hydrostatische kracht op de bodem en op de zijwanden.

2.11 Wet verbonden vaten

Uit de formule voor de hydrostatische druk nl.:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

kun je goed begrijpen dat de hoogte van twee verbonden vaten dezelfde is. De vloeistof met massadichtheid ρ is immers dezelfde en ook g verandert niet, dus moet ook h gelijk zijn.



PROEF

Uit de proef stellen we vast dat de oppervlakken steeds horizontaal blijven wat ook de vorm van het vat is.

Hieruit kunnen we besluiten dat de vrije oppervlakken van een vloeistof in open verbonden vaten in een horizontaal vlak liggen, hoe ook de vorm van het vat is.

Toepassingen

Een peilglas, een flesjeswaterpas, sluisdeuren, een waterput, de waterdistributie, een fontein.

2.12 Verschillende niet mengbare vloeistoffen

PROEF

Een flesje is gevuld met water en olie. We stellen vast uit het proefje dat olie en water zich boven elkaar plaatsen. Ook na schudden komt men weer in de oorspronkelijke toestand.

PROEF

In het lab kunnen we uit de proef met de verbonden vaten de massadichtheid bepalen, maar alleen als de twee vloeistoffen niet mengbaar zijn.

Uit $p_1 = p_2$

is ook $\rho_1 \cdot h_1 \cdot g = \rho_2 \cdot h_2 \cdot g$

waaruit de dichtheid van een van de twee vloeistoffen volgt als de andere gekend is.

2.13 Vragen en opgaven

1 In twee verbonden vaten giet men eerst kwik met massadichtheid $\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$. Daarna giet men in een van de benen water tot het waterpeil 60 cm bedraagt. Bereken de stand van de vloeistofspiegels boven de scheidingswand.

2 In een U-vormige buis brengen we een hoeveelheid kwik. In het linkerbeen gieten we water tot op 30 cm boven het kwikniveau en in het rechterbeen alcohol eveneens tot 30 cm boven het kwikniveau. Bereken het hoogteverschil tussen de kwikniveaus in beide benen van de U-vormige buis. ($\rho(\text{alcohol}) = 0,8 \text{ g/cm}^3$; $\rho(\text{kwik}) = 13,6 \text{ g/cm}^3$; $\rho(\text{water}) = 1,0 \text{ g/cm}^3$)

3 DRUK IN GASSEN

3.1 Voorbeelden

Gassen oefenen druk uit op de wanden van het vat, waarin ze opgesloten zitten. Dat weet je allang. Een paar voorbeelden zullen je geheugen oprispen:

- niets is zo vervelend als fietsen op 'slappe' banden. Door de banden op te pompen wordt er voldoende druk uitgeoefend zodat het fietsen opnieuw een lieve lust wordt
- ballonnen prijken in volle pracht en praal wanneer de ingeblazen lucht druk uitoefent op de wand
- in gasflessen van butaan of propaan zit het gas onder vrij hoge druk gestockeerd
- bij ontploffingen wordt er zoveel druk uitgeoefend op de lucht dat je de luchtverplaatsing kan voelen
- spuitbussen bevatten gassen onder druk. Het gas dient om de vloeistof te verstuiven

Deze druk in gassen noemen we aërostatische druk of gasdruk.

Uiteraard vragen we ons af hoe een gas druk kan uitoefenen?

Een gas is opgebouwd uit moleculen. Die zijn voortdurend in beweging. Daardoor botsen ze voortdurend, zowel onderling als op de wanden van het vat, waar ze in opgesloten zitten.

Al deze botsingen tezamen veroorzaken de druk op de wanden van het vat.

Schematisch

- Een gas oefent een druk uit op elk oppervlak, waarmee het in aanraking komt.
- Deze druk noemt men aërostatische druk of gasdruk. Hij wordt in alle richtingen uitgeoefend.
- De aërostatische druk is het gevolg van botsingen, die snel vliegende gasmoleculen uitoefenen tegen de wanden.

3.2 Bestaan van luchtdruk

Lucht is uiteraard het gasmengsel waar we het meest mee in aanraking komen. Ook in de lucht heerst er druk. Dat kunnen we mooi aantonen met een paar proefjes.

PROEF

Een heel licht opgeblazen ballon wordt in de luchtklok van een vacuümpomp geplaatst. We pompen de lucht weg van onder de klok.



Waarneming

De ballon wordt opgeblazen naarmate we de klok luchtledig zuigen.

PROEF

Een cellofaanpapier sluit een glazen buis af die in verbinding staat met de luchtpomp. We pompen de lucht weg.



Waarneming

Het stuk cellofaan knalt stuk.

PROEF

Twee halve bollen worden op elkaar geplaatst, zodat het geheel hermetisch afgesloten is. De bol wordt luchtledig gezogen. Daarna proberen we om de beide bolhelften uit elkaar te rukken.



Waarneming

De twee bolhelften blijven tegen elkaar geplakt, hoe hard we ook trekken.

Met al deze proeven hebben we willen aantonen dat de luchtdruk altijd aanwezig is. Meestal kunnen we hem niet waarnemen. Dat is heel normaal.

Als we de proef met de opgeblazen ballon bijvoorbeeld nog eens overdenken dan kunnen we besluiten dat dit systeem in evenwicht is. De druk in de ballon is even groot als de druk erbuiten. Als we echter de lucht rond de ballon wegzuigen dan oefent de lucht in de ballon een grotere druk uit; daardoor gaat het volume van de ballon toenemen. We kunnen de luchtdruk dus slechts zichtbaar maken als we aan de ene kant van een wand de lucht verwijderen.

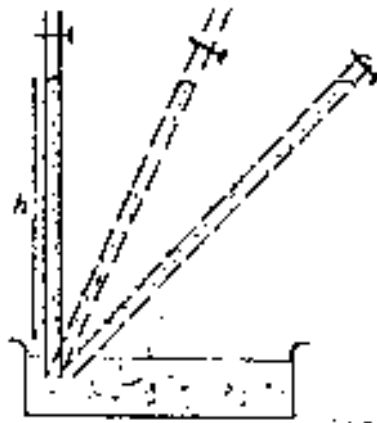
Schematisch

Lucht is een mengsel van gassen. De druk die in de lucht heerst, noemen we luchtdruk of atmosferische druk.

3.3 Meten van de atmosferische druk

PROEF: Proef van Torricelli

Een glazen buis van ongeveer 1 meter lengte en oppervlakte A kan bovenaan afgesloten worden met een kraantje. De buis wordt verticaal in een bak geplaatst, die gevuld is met kwik. Met de vacuümpomp zuigt men de buis luchtledig zodat het kwik er in opstijgt.



Waarneming

Het kwik blijft op een hoogte van ongeveer 76 cm of 0,76 m boven het niveau in het kwikbad staan. Houden we de buis geleidelijk schuin, dan blijft deze verticale afstand dezelfde.

3.4 Berekenen van de atmosferische druk

Als we nu eens doordenken over de proef, komen we tot het besluit dat de druk op de vloeistof rond de buis groot genoeg is om de kwikzuil in de buis tegen te houden.

Rond de buis heerst de atmosferische druk; in de buis wordt op het oppervlak A een druk uitgeoefend door de kwikzuil.

Er is evenwicht, daaruit volgt dat:

$$p(\text{atmosfeer}) = p(\text{kwik})$$

$$p(\text{atmosfeer}) = F(\text{kwik}) / A$$
$$p(\text{atmosfeer}) = m \cdot g / A = \rho \cdot V \cdot g / A$$

Vermits er geldt dat $V = A \cdot h$ kunnen we de formule schrijven als: $p(\text{atmosfeer}) = \rho \cdot g \cdot h$

Het is nu klein bier om de grootte van de atmosferische druk te bepalen. Er geldt immers dat:

- hoogte $h = 0,76 \text{ m}$
- massadichtheid van kwik $\rho = 13600 \text{ kg/m}^3$
- veldsterkte $g = 9,8 \text{ N/kg}$.

De grootte van de atmosferische druk is dus gelijk aan:
 $p(\text{atmosfeer}) = 13600 \cdot 0,76 \cdot 9,8 = 101292,8 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$

Schematisch

De atmosferische druk is gelijk aan 1013 hPa.

3.5 Vragen en opgaven

- 1 Zou men de kwikkolom van een vloeistofbarometer korter kunnen maken door een brede buis van Torricelli te nemen?
- 2 Is de oorzaak van het ontstaan van de druk in een vloeistof dezelfde als die van de druk in een gas?
- 3 Op zekere dag doet men de proef van Torricelli. Het kwik staat 76,4 cm boven de kwikspiegel in de bak. Hierna wordt de proef uitgevoerd met een vloeistof met massadichtheid 1250 kg/m^3 . Hoe hoog staat deze vloeistof in de buis?
- 4 Hoeveel gram kwik staan in een barometerbuis met $3,20 \text{ cm}^2$ oppervlakte op het ogenblik dat de atmosferische druk 1000 hPa bedraagt?

3.6 Overdruk en onderdruk

Is de druk p groter dan $p(\text{atmosfeer})$

dan is $p = p(\text{atmosfeer}) + \rho \cdot g \cdot h$

Is de druk p kleiner dan $p(\text{atmosfeer})$

dan is $p = p(\text{atmosfeer}) - \rho \cdot g \cdot h$

3.7 Drukverandering met de hoogte

Hoe hoger men gaat hoe kleiner de druk van de dampkring. Voor niet te grote hoogteverschillen blijft onderstaande formule gelden.

$$dp = \rho \cdot g \cdot dh$$

We weten dat de dichtheid van lucht in feite niet constant is. Ze bedraagt 1,29 kg/m³ (g/l) bij 0°C en 1013 hPa.

$$p(\text{lucht}) = p(\text{kwik})$$

$$\rho(\text{lucht}) \cdot g \cdot h(\text{lucht}) = \rho(\text{Hg}) \cdot g \cdot h(\text{Hg})$$

$$\text{of } h(\text{lucht}) = \frac{\rho(\text{Hg})}{\rho(\text{lucht})} \cdot h(\text{Hg}) = \frac{13600}{1,29} \cdot h(\text{Hg})$$

$$h(\text{lucht}) = 10500 \cdot h(\text{Hg})$$

Dit betekent dat als de barometer druk 1 mm daalt, we dan 10,5 m hoog stijgen. In het lab bepalen we de hoogte van het schoolgebouw.

Voorbeeld

Als we 2 km hoog zitten hoeveel is dan het kwikniveau gedaald?

Uit $h(\text{Hg}) = 2000/10500 = 0.190$ m weten we dat het 19 cm is!!

4 ARCHIMEDESKRACHT

4.1 Opwaartse kracht

Wanneer we een voorwerp onderdompelen in een vloeistof of een gas dan ondervindt het een opwaartse kracht. Dit noemen we de Archimedes kracht. Zo, dat weet je ook al weer. Maar eigenlijk illustreren we dat beter met een aantal voorbeelden en proeven.

- Heb je al eens geprobeerd 'vanzelf' te zinken in het zwembad? Dat ging niet gemakkelijk, is het niet? Als je flink inademt blijf je zelfs gewoon drijven!! Blijkbaar word je dan door het water 'gedragen'. Anders gezegd: het water oefent een opwaartse kracht op je lichaam uit.

PROEF

Duw een leeg proefbuisje in het water.

Waarneming

Je voelt dat het buisje uit het water geduwd wordt door de opwaartse kracht van het water.

- Als je een met helium gevuld ballonnetje vast hangt aan een draad, dan staat die draad gespannen. Deze ballon wordt door de omgevende lucht "gedragen": de lucht oefent een opwaartse kracht uit.

PROEF

Onder de klok van een vacuümpomp plaatsen we een balans. Aan de ene arm hangen we een glazen bol met groot volume (A) en aan de andere een metalen blokje (B) met een klein volume.

In lucht zijn de beide armen van de balans in evenwicht. Met de vacuümpomp zuigen we de klok luchtledig.



Waarneming

Naarmate de klok luchtledig gezogen wordt, daalt bol A.

Verklaring

Bol A 'weegt' natuurlijk niet meer dan voordien, maar door het wegpompen van de lucht verdwijnt de opwaartse kracht, die de lucht op de bol uitoefende. Op bol B heerste van bij het begin een kleinere opwaartse druk omdat zijn volume kleiner is. Bij het wegpompen van de lucht daalt de opwaartse kracht relatief minder dan in het geval van bol A.

Schematisch

Vloeistoffen en gassen oefenen een opwaartse kracht uit op een voorwerp dat (geheel of gedeeltelijk) ondergedompeld is. Die opwaartse kracht noemen we de Archimedes kracht.

4.2 Oorzaak van de Archimedes kracht

Om dit te weten te komen, nemen we een bad, samen met een kubusvormig lichaam, om de grootte van de hydrostatische druk op het voorwerp nauwkeurig te controleren.

Op het ondergedompelde lichaam werkt de hydrostatische druk aan alle kanten. De druk op de beide zijwanden is gelijk, zodat er geen netto kracht merkbaar is. Op de onderkant van het voorwerp werkt er echter een druk naar boven gericht, terwijl op de bovenkant een druk naar beneden heerst. De druk op de onderkant is groter dan op de bovenkant. Dat komt natuurlijk omdat de onderkant dieper in de vloeistof zit en de hydrostatische druk daar groter is.

Het resultaat is een netto kracht die het voorwerp naar boven duwt. We constateren dus dat de opwaartse kracht in gassen of vloeistoffen het directe gevolg is van de hydrostatische kracht.

Je zal nu allicht opmerken dat een baksteen zinkt als je ermee in bad gaat. Op die terechte opmerking komen we later terug.

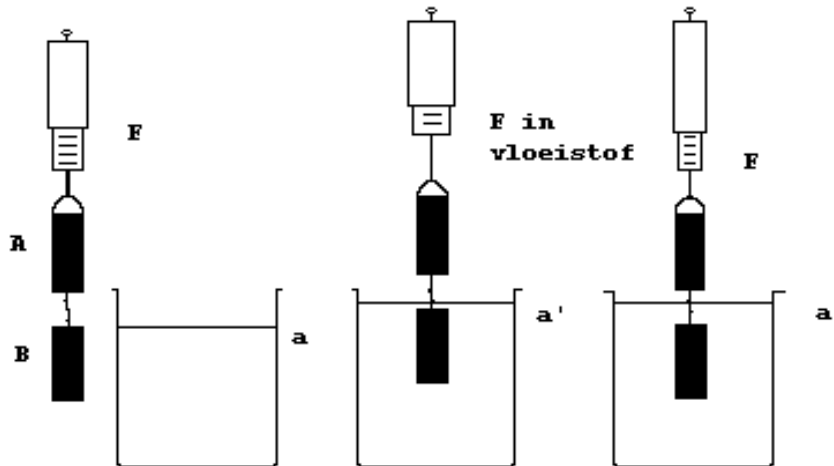
Schematisch

De Archimedes kracht is het gevolg van de hydrostatische kracht.

4.3 Hoe groot is de Archimedes kracht?

PROEF

Aan een dynamometer hangen we een metalen blokje (B) en een emmertje (A). Het metalen blokje past precies in het emmertje. We bepalen het gewicht F van de beide voorwerpen tezamen. We dompelen nu het metalen blokje in het water. Door de opwaartse kracht duidt de dynamometer nu een gewicht $F(\text{in vloeistof})$ aan, dat kleiner is dan het gewicht F . Hierna vullen we het emmertje volledig met water.



Waarneming

De dynamometer duidt opnieuw het oorspronkelijke gewicht F aan.

Noot

Als het blokje B ondergedompeld wordt dan kan je zien dat het vloeistofniveau stijgt van a naar a' . Dit is logisch, want waar het blokje is kan er geen vloeistof zijn. Die vloeistof is verplaatst. Het volume van de verplaatste vloeistof is daarbij gelijk aan het volume van het ondergedompelde lichaam.

Besluit

Uit de proef kunnen we heel wat leren:

- wanneer een voorwerp ondergedompeld wordt in water, ondervindt het een opwaartse kracht. Daardoor verliest het schijnbaar aan gewicht.
- de grootte van de opwaartse kracht is gelijk aan het gewicht van het verplaatste water.

PROEF

We hernemen voorgaande proef, maar nu werken we met norvanol. De dichtheid van norvanol is kleiner dan die van water.

Waarneming

De opwaartse kracht is kleiner dan bij water. Hij is wel opnieuw gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

Besluit

De grootte van de opwaartse kracht is eveneens afhankelijk van de aard van de vloeistof.

We willen nu ook nog de grootte van de opwaartse kracht berekenen. Als we de opwaartse kracht voorstellen door F_A dan kunnen we uit de proef afleiden dat:

$$F_A = F(\text{verplaatste vloeistof})$$

We weten nog dat:

$$F(\text{verplaatste vloeistof}) = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

Hierbij is ρ de massadichtheid van de vloeistof en V het volume van het ondergedompelde lichaam (= volume van de verplaatste vloeistof).

De formule voor F_A wordt daardoor:

$$F_A = \rho \cdot V \cdot g$$

Schematisch

Een lichaam dat ondergedompeld wordt in een vloeistof, ondervindt een opwaartse kracht. Daardoor verliest het voorwerp schijnbaar aan gewicht.

De Archimedes kracht is afhankelijk van het volume van het lichaam en van de dichtheid van de vloeistof.

De Archimedes kracht is gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

4.4 Theoretisch bewijs wet van Archimedes

Veronderstel dat we het ondergedompeld lichaam uithollen tot er een heel dun onvervormbaar vlies met gewicht nul overblijft. We vullen nu het vlies met vloeistof dan werken er op het vlies volgende krachten

1 de aantrekkingskracht van de aarde = gewicht van de ingesloten vloeistof, is verticaal naar beneden gericht en grijpt aan in het zwaartepunt.

2 de hydrostatische krachten = de stuwkracht die ontspringen loodrecht op de wanden en die groter zijn onderaan. De resultante is dus even groot en tegengesteld aan de kracht van punt 1.

Vullen we nu weer het lichaam, dan is er niets veranderd!!

Merk op dat de stuwkracht aangrijpt in het perspunt P , dit is het analoog van het zwaartepunt Z als het voorwerp volledig ondergedompeld is in de vloeistof. Is het niet volledig ondergedompeld dan is het perspunt het zwaartepunt van het ondergedompelde deel.

We kunnen nu de wet van Archimedes ook bewijzen voor een regelmatig meetkundig lichaam

$$F(\text{bovenaan}) = A \cdot h_1 \cdot \rho_{\text{vl}} \cdot g$$

$$F(\text{onderaan}) = A \cdot h_2 \cdot \rho_{\text{vl}} \cdot g$$

de resultante is dan

$F_A = (A \cdot l) \cdot \rho_{vl} \cdot g$ met $l = h_2 - h_1$
met $V = A \cdot l$ het volume van het lichaam

$$F_A = \rho_{vl} \cdot V \cdot g$$

Uit het experiment was:

$$F_A = F(\text{lucht}) - F(\text{in vloeistof})$$

PROEF

In het lab voeren we proeven uit om de dichtheid van een voorwerp met onregelmatige vorm, van een vloeistof te bepalen. We voeren de proef uit met de hydrostatische balans.

4.5 Toepassingen van de Archimedes kracht

4.5.1 Zweven

Een ballon in de lucht en een onderzeeboot onder water zweven. Dit wil zeggen dat het gewicht van het voorwerp precies gelijk is aan de opwaartse kracht F_A .

Om de ballon te laten stijgen gooit men ballast (zand) uit: het gewicht F wordt dan kleiner en F_A wint. Om de ballon te laten dalen laat men gas ontsnappen: het volume van het gas wordt daardoor kleiner en dus ook F_A . Daardoor overheerst dus het gewicht F .

Een onderzeeboot is voorzien van ballasttanks die water bevatten. Om het schip te doen stijgen, pompt men water uit de ballasttanks in zee; om te dalen wordt er water in de tanks gepompt.

4.5.2 Drijven of zinken

Duw een houten blokje tot juist onder water en laat het los: het stijgt op en blijft drijven. Hoe komt dat?

Op elk moment zijn er twee krachten werkzaam op het blokje:

- enerzijds duwt het gewicht F_g het blokje naar beneden
- anderzijds stuwt de opwaartse kracht van het water F_A het blokje naar boven.

We vergelijken de beide krachten met elkaar.

Omdat de dichtheid van water groter is dan de dichtheid van het hout is de opwaartse kracht groter dan het gewicht van het voorwerp. Het blokje stijgt dus op tot het gedeeltelijk boven het water uitsteekt. Daardoor is het volume van het ondergedompelde deel van het blokje kleiner geworden. De opwaartse kracht wordt dus kleiner.

Op een bepaald moment is de opwaartse kracht gelijk aan het gewicht van het blokje. Het blokje drijft.

De dichtheid van metaal of steen daarentegen is groter dan de dichtheid van water. Metalen of stenen voorwerpen zullen dus zinken (denk maar aan onze baksteen in de badkuip).

4.5.3 Formules over zinken, zweven en drijven

PROEF

Vullen we een maatcilinder eerst met water en daarna vullen we bij met alcohol. In deze oplossing brengen we een stukje lood, kurk, paraffine en een paar druppels olie.



Waarneming

We stellen vast dat lood zinkt, kurk en paraffine drijven en de oliedruppel zweeft.

Besluit

Beschouwen we een voorwerp met volume V en dichtheid ρ_{vast} die we in een vloeistof met dichtheid $\rho_{\text{vloeistof}}$ brengen dan zijn hierop twee krachten werkzaam:

1. het gewicht $F = \rho(\text{vast}) \cdot g \cdot V$ grijpt aan in Z en is naar beneden gericht
2. de Archimedes kracht $F_A = \rho(\text{vl}) \cdot g \cdot V$ grijpt aan in P en is naar boven gericht

Is dan $F > F_A \implies \text{vast} > \text{vl} \implies \text{zinken}$

$F = F_A \implies \text{vast} = \text{vl} \implies \text{zweven}$

$F < F_A \implies \text{vast} < \text{vl} \implies \text{drijven}$

De dichtheid is dus een essentiële factor voor het bepalen van het zinken, zweven of drijven. Maken we gebruik van tabellen dan kunnen we weten wat gebeurt met de gevraagde stof, op voorwaarde dat we de massadichtheden kennen.

4.5.4 Voorbeelden uit het dagelijks leven

- Zout water heeft een grotere dichtheid dan zuiver water. De opwaartse kracht is er groter. In de Dode Zee is het zoutgehalte van het water zo groot dat je er zonder meer kunt drijven op het water. Let er wel op dat je na een 'duik' in dat zoute water een grondige douchebeurt voorziet. Zout water is immers heel slecht voor de huid.

- De dichtheid van ijs is 920 kg/m^3 . Ijs drijft dus op het water. Maar je ziet slechts het topje van de ijsberg. Een tiende van het ijsvolume steekt boven het water uit, terwijl al de rest verborgen zit onder de zeespiegel. Dat is uiteraard een uiterst gevaarlijke situatie. De ramp met de Titanic (14 april 1912) was te wijten aan zo'n verborgen ijsmassa. Tijdens zijn eerste reis botste het schip op het 'onderwatergedeelte' van een ijsberg, scheurde open en zonk in korte tijd.

- Een metalen schip drijft omdat de opwaartse kracht van het water gelijk is aan het gewicht van het schip. Dat kan natuurlijk alleen als het gewicht niet te groot is. Daarom is een metalen schip binnenin hol. Bovendien mag het schip niet al te zwaar geladen worden. Het Plimsollmerk helpt daarbij om na te gaan of het niet te hoog of te laag in het water ligt.

Schematisch

Een lichaam zweeft als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof gelijk is aan het gewicht van het voorwerp.

Een lichaam drijft als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof groter is dan het gewicht van het voorwerp.

Een lichaam zinkt als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof kleiner is dan het gewicht van het voorwerp.

4.5 Vragen en opgaven

1 Men plaatst een metalen cilinder met zijn basis op de bodem van een vloeistof, zodanig dat er geen vloeistof is tussen de cilinder en de bodem van het vat. Denk je dat de Archimedes kracht nu werkzaam is?

2 Men duwt een kubus steeds dieper in een vloeistof. Verandert de Archimedes kracht? Verandert de druk op de zijvlakken van het lichaam?

3 Is het waar dat een drenkeling zijn kans op overleven vergroot door:

- zijn hoofd achterover te houden
- zijn armen onder water te steken
- diep in te ademen.

4 Een blok ijzer van 24 cm^3 wordt geheel ondergedompeld in benzine waarvan de dichtheid gelijk is aan $0,70 \text{ g/cm}^3$. Bereken de Archimedes kracht die het ijzer ondervindt. Bereken het gewicht van ijzer in benzine (de dichtheid van ijzer = $7,2 \text{ g/cm}^3$).

5 Een stuk basalt heeft een massa van 180 kg onder water. De massadichtheid van basalt is 2500 kg/m^3 . Bereken het gewicht van het stuk basalt ($\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$).

6 Een mengsel van lood en tin heeft een massa van 565 g. In olie gedompeld heeft het een massa van 502 g. Hoeveel gram lood en hoeveel gram tin zijn in de legering aanwezig? ($\rho(\text{lood}) = 12 \text{ g/cm}^3$; $\rho(\text{tin}) = 6.5 \text{ g/cm}^3$; $\rho(\text{olie}) = 0.90 \text{ g/cm}^3$)

7 Een hol ijzeren voorwerp heeft een massa van 78 g. In water ondergedompeld heeft het een massa van 63 g. Hoe groot is de holte als de massadichtheid van ijzer 7.8 g/cm^3 is?

8 Een stuk metaal met massa 120 g. In water ondergedompeld is zijn massa 110 g, in alcohol 114 g. Bepaal de massadichtheid van metaal en alcohol.

9 Een ijzeren emmer van 10 l inhoud wordt in een put onder water gevuld. Welke kracht is er nodig om de emmer op te trekken: 1) onder water 2) boven water? De massa van de ijzeren emmer is 390 g en $\rho(\text{Fe}) = 7,8 \text{ g/cm}^3$.

10 Bereken het massaverschil tussen 1 kg laiton en 1 kg ijzer, wanneer beide onder water gedompeld zijn. $\rho(\text{laiton}) = 8.6 \text{ g/cm}^3$ en $\rho_{\text{ijzer}} = 7.8 \text{ g/cm}^3$.

4.6 Evenwichtstoestanden van drijvende lichamen

Een drijvend lichaam drijft omdat de Archimedes kracht werkzaam is, naast het gewicht van het lichaam.

Wanneer zal een drijvend lichaam kantelen? Is een drijvend lichaam stabiel?

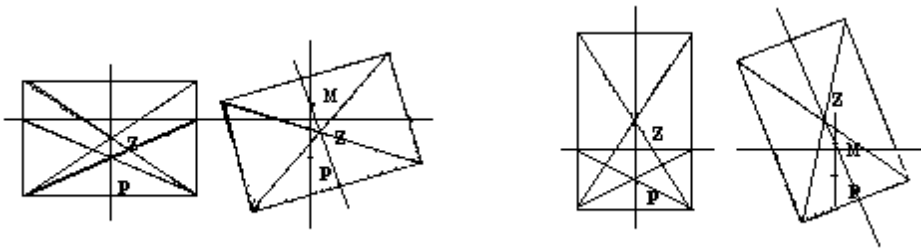
Om dit te weten gaan we wat dieper in op de studie van drijvende lichamen. Naast de twee belangrijke punten nl. Z het zwaartepunt en P het perspunt kunnen we nog een derde punt construeren nl. M het metacentrum.

Door het zwaartepunt tekenen we de loodlijn door het lichaam. Door het perspunt tekenen we de loodlijn op het wateroppervlak. Het snijpunt van deze twee lijnen geeft ons het metacentrum M.

Kantelt men nu het drijvend lichaam, dan zijn er twee mogelijkheden zoals op de figuur te zien is:

M boven Z: stabiel

M onder Z: labiel



De kennis van het stabiel evenwicht is belangrijk bij de constructie van o.a. ferry's. Denk maar aan de ramp met de Herald of Free Enterprise.

Valt het metacentrum samen met het zwaartepunt, dan heeft men onverschillig evenwicht, dit kan bijvoorbeeld bij een bal die op water drijft.

4.7 Densimeters

Het zijn toestellen die gebruikt worden om rechtstreeks dichtheden (g/cm^3) af te lezen. Ze zijn eveneens gesteund op de wet van Archimedes. Er bestaan twee soorten densimeters, nl. deze met constant volume en deze met constant gewicht. (we behandelen alleen de laatste)

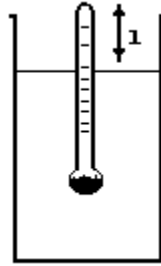
Uit de figuur

V = totaal volume

A = doorsnede buis

l = lengte toestel boven water

V' = volume ondergedompeld deel



$$V' = V - A \cdot l$$

F = gewicht densimeter

ρ = massadichtheid vloeistof

$$F = \rho \cdot g \cdot V'$$

$$\text{of } \rho = \frac{F}{g \cdot V'} = \frac{m \cdot g}{g \cdot (V - A \cdot l)} = \frac{m}{V - A \cdot l} = \frac{m/A}{V/A - l} = \frac{a}{b - l}$$

Hierin zijn a en b twee constanten die door ijken met twee vloeistoffen kunnen bepaald worden. De proef voeren we uit in het labo. We bepalen a en b op twee manieren en vergelijken de resultaten.

4.8 De luchtballon

Een luchtballon bestaat uit een volume gevuld met een zeer licht gas, zodat de opwaartse drukkracht groter wordt dan het eigen gewicht van de ballon met gas en met lading. Hierdoor zal het geheel gaan drijven op lucht!!

Bij de opwaartse beweging zal de ballon terechtkomen in hogere luchtlagen, waar de massadichtheid van de lucht ($1,29 \text{ kg/m}^3$) kleiner is dan op de begane grond. Op een bepaald ogenblik zal de massadichtheid zodanig verminderd zijn dat de opwaartse drukkracht gelijk wordt aan het gewicht van de ballon + gas + lading: $F_A = F(\text{totaal})$

De ballon stijgt dan niet meer, maar zweeft.

Om dit aan te tonen maken we gebruik van een berekeningsvoorbeeld.

Veronderstellen we dat een luchtballon een stijgkracht moet bezitten van 3000 N en dat haar eigen gewicht met toebehoorden 5000 N is.

Hoe groot zal het volume van de ballon moeten zijn als je gebruik maakt van een gas met $\rho = 0,50 \text{ kg/m}^3$, en $\rho(\text{lucht}) = 1,29 \text{ kg/m}^3$. Het totaal gewicht is $F' = 8000 \text{ N}$. De opwaartse drukkracht moet gelijk zijn aan het totaal gewicht van de ballon + lading + toebehoorden + stijgkracht (= F') vermeerderd met het gewicht van het vulgas van de ballon zelf (= $F'' = \rho(\text{gas}) \cdot V \cdot g$) zodat $F(\text{totaal}) = F' + F''$

Nu is de opwaartse drukkracht gelijk aan het gewicht van de verplaatste lucht nl.

$$F_A = \rho \cdot V \cdot g$$

$$\text{Hieruit } \rho \cdot V \cdot g = 8000 + \rho(\text{gas}) \cdot V \cdot g$$

$$\text{of } V = \frac{8000}{9,8 (1,29 - 0,50)} = 1032,3 \text{ m}^3$$

Daar de ballon bijvoorbeeld bolvormig is kunnen we ook de straal berekenen uit de formule $V = \frac{4}{3} \pi r^3$

We kunnen ook berekenen bij welke dichtheid van lucht de ballon gaat zweven. Dit kan als de stijgkracht 0 is, dan wordt $F' = 5000 \text{ N}$ in ons voorbeeld. We vinden hiervoor +/- $0,99 \text{ kg/m}^3$. Dit stemt met een welbepaalde hoogte overeen.

Vragen en opgaven

1 Een bolvormige ballon heeft een diameter van 15 m en wordt gevuld met een gas met massadichtheid $0,70 \text{ kg/m}^3$ ($\rho(\text{lucht}) = 1,29 \text{ kg/m}^3$). Welke lading zal ze kunnen meenemen? Haar eigen gewicht en toebehoorden is 4000 N en de stijgkracht bedraagt 2000 N .

2 Welke moet de diameter van een ballon zijn die in staat is twee personen met massa 70 kg te kunnen meenemen, wanneer haar eigen massa en toebehoren 350 kg bedraagt en het gas een massadichtheid van $0,60 \text{ kg/m}^3$ heeft. De vereiste stijgkracht is 500 N en $\rho(\text{lucht}) = 1,29 \text{ kg/m}^3$.

4.9 Wegen in het luchtledige

Een lichaam in een gas ondergedompeld schijnt zoveel van haar gewicht te verliezen als het gewicht van het verplaatste gas.

$$F_A = \rho(\text{gas}) \cdot V \cdot g$$

$$F_A = F - F(\text{in gas})$$

Het gewicht in gas noemt men het schijnbaar gewicht. Dit is steeds kleiner dan het werkelijk gewicht F . Bij wegingen in lucht, hetgeen altijd zo gebeurt maakt men dus een kleine fout.

Om perfect te meten zouden we het gewicht in het luchtledige moeten kennen. Hoe kunnen we het gewicht van een lichaam in het luchtledige kennen zonder in het luchtledige te wegen?

We maken een berekeningsvoorbeeld.

Een stukje aluminium heeft een massa van 1000.000 g in lucht; de ijkgewichten zijn uit messing met $\rho = 8,4 \text{ g/cm}^3$

en hebben dus een volume van $V = 1000 / 8,4 = 119,048 \text{ cm}^3$

de stuwkracht $F(\text{ijk}) = 1,29 \cdot 9,8 \cdot 119,048 \cdot 10^{-6} = 1,505 \cdot 10^{-3} \text{ N}$

terwijl het gewicht in lucht

$$F(\text{lucht}) = 1 \cdot 9,8 = 9,8 \text{ N}$$

het schijnbaar gewicht is dan (= gewicht in lucht - stuwkracht)

$$F \text{ schijnbaar} = 9,8 - 1,5065 \cdot 10^{-3} = 9,798 \text{ N}$$

dit is ook het schijnbare gewicht van het stukje aluminium

Nu is $\rho(\text{Al}) = 2,5 \text{ g/cm}^3$

Veronderstel dat x = gewicht in het luchtledige

Dan is schijnbaar gewicht = gewicht - stuwkracht.

$$\begin{array}{ccc} \text{(In luchtledige)} & & \text{(in luchtledige) (in luchtledige)} \\ & & x \end{array}$$

$$\text{of } 9,798 = x - \frac{x}{2500} \cdot 1,29$$

$$9,789 = x - 0,000516 \cdot x$$

$$9,798 = 0,999484 \cdot x$$

$$x = 9,803 \text{ N}$$

of $m = 1,000312 \text{ kg} = 1000,312 \text{ g}$ dit is 312 mg meer!!

5 OPPERVLAKTEVERSCHIJNSELEN

5.1 Elastische eigenschappen van een vloeistofoppervlak

PROEF

We brengen een metalen speld voorzichtig op het wateroppervlak.



Waarneming

De speld drijft op het water.

PROEF

In een beker met water brengen we zwavelpoeder. Daarna voegen we waspoeder toe.

Waarneming

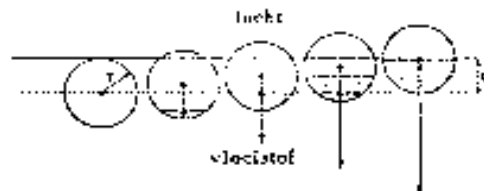
Het zwavelpoeder drijft op water, toevoegen van waspoeder doet het zinken.

Besluit

In tegenstelling met onze verwachtingen gebeurt er in de oppervlaktelaag iets vreemd. Het vrije vloeistofoppervlak gedraagt zich als een elastisch vlies.

Verklaring

De vloeistof moleculen oefenen cohesiekrachten uit die een bepaalde actiesfeer hebben met straal $1 \cdot 10^{-8}$ m tot $1 \cdot 10^{-9}$ m



De molecule A zit nog in de vloeistof, terwijl de molecule B buiten het vloeistofoppervlak gelegen is op een afstand $< r$ met actiesfeer buiten de vloeistof. De resulterende spanning staat loodrecht op het vloeistofoppervlak. Vandaar een vliësvorming, zodat het oppervlak inderdaad elastische eigenschappen heeft. Omdat de oppervlakte van het vloeistofoppervlak liefst zo klein mogelijk is spreekt men van minimumoppervlakken. Zo heeft een vloeistof druppel de bolvorm, dit is blijkbaar een minimumoppervlak.

5.2 Oppervlakte-energie en oppervlaktespanning

Om nu een vloeistof molecule uit de oppervlaktelaag te brengen zal men arbeid moeten leveren, een molecule in de oppervlaktelaag bezit dus potentiële energie of oppervlakte-energie, die groter is naarmate er meer moleculen in de oppervlaktelaag liggen.

$$E(\text{opp}) \sim A \quad \text{of} \quad \frac{E(\text{opp})}{A} = \text{constante met } E(\text{opp}) \text{ minimaal}$$

Die constante is afhankelijk van de grootte van de cohesiekrachten d.w.z. de aard van de vloeistof.

Men stelt die constante = τ (tau) = oppervlaktespanning

$\tau = \frac{E(\text{opp})}{A}$

Eenheden τ : J/m² (of ook N/m)

5.3 Vloeistof in contact met vaste wand

Proef

We brengen een glasstaaf in water en in kwik. We zien dat er hier twee krachten werkzaam zijn nl. de cohesie en de adhesie.

Bij water kleeft de vloeistof aan de staaf en is de cohesie kleiner dan de adhesie. Bij kwik blijft de vloeistof niet kleven, daar is de cohesie groter dan de adhesie (de vloeistof neemt de bolvorm aan).

Een contact laag gedraagt zich als een vrij oppervlak

cohesie < adhesie F resulterend naar wand gericht

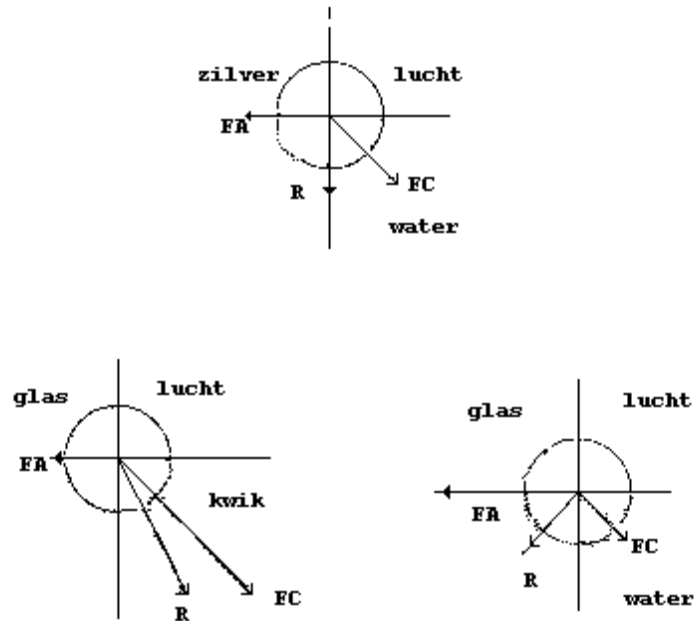
cohesie > adhesie F resulterend naar vloeistof

5.4 Bolle en holle stand van een vrij vloeistofoppervlak aan de vloeistofrand

F_c is de resultante van de cohesiekrachten

F_a is de resultante van de adhesiekrachten

α is de hoek tussen het vloeistofoppervlak en de wand



Dit zijn de drie mogelijke gevallen

5.5 Capillaire opstijging en neerdrukking

PROEF

Brengen we een stel capillairen in water dan zien we dat hoe dunner het capillair hoe hoger het water opstijgt. (met kwik is het juist omgekeerd)

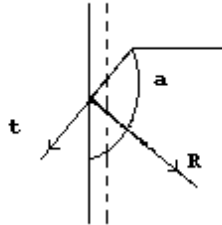


Besluit

Vloeistoffen die de wand bevochtigen stijgen op in capillairen zoals water, alcohol, ether. Vloeistoffen die de wand niet bevochtigen worden naar omlaag gedrukt zoals kwik.

5.6 Bewijs van de wet van Jurin

We beschouwen kwik in een capillaire buis met binnendiameter d .
De contacthoek α is hier groter dan 90 graden.



$$\beta = 180^\circ - \alpha$$

De oppervlaktespanning τ splitsen we in τ_1 en τ_2

de τ_2 compenseren elkaar

$$\text{en } \tau_1 = \tau \cdot \cos \beta = \tau \cdot \cos (180 - \alpha)$$

$$= - \tau \cdot \cos \alpha$$

(het minteken wijst erop dat de kracht naar beneden gericht is en speelt geen rol voor de grootte)

Is d de binnendiameter dan is de lengte van de randlijn $l = \pi d$. De randlijn ondergaat dus een verticaal naar beneden gerichte kracht.

$$F = \tau \cdot \cos \alpha \cdot \pi d$$

Vermits het vrije vloeistofoppervlak zich als een vlies gedraagt gebeurt alles alsof de vloeistof omlaag getrokken wordt met een kracht F .

De doorsnede van de buis is

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\text{en } p(\text{cap}) = \frac{F}{A} = \frac{\tau \cdot \cos \alpha \cdot (\pi d)}{\pi d^2/4} = \frac{4 \cdot \tau \cdot \cos \alpha}{d}$$

$$p(\text{hydrostatisch}) = \rho \cdot g \cdot h$$

Bij evenwicht is $p(\text{hydrostatisch}) = p(\text{cap})$

$$4 \cdot \tau \cdot \cos \alpha$$

zodat $\rho \cdot g \cdot h = \frac{\text{-----}}{d}$

waaruit de wet van Jurin volgt

$$h = \frac{4 \cdot \tau \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot d}$$

Merk op dat als men h meet, men hieruit ook t kan bepalen

5.7 Toepassingen van de wet van Jurin

- opstijgen van petroleum of benzine in een wiek
- vochtigheid in muren
- bepalen binnendiameter capillaire buis

6 TOESTELLEN DIE OP HET DRUKBEGRIP STEUNEN

6.1 Barometers

Het zijn toestellen om de luchtdruk te meten. Er bestaan twee soorten nl. de kwikbarometers en de metaalbarometers.

Op een barometer staan volgende aanduidingen: storm, regen, wind, veranderlijk, mooi...

Een drukstijging wijst op een verbetering van het weer terwijl een drukdaling wijst op een verslechtering van het weer. Op de weerkaart staan naast luchtdruk ook de temperatuur, de bewolking, de windrichting, de windsnelheid, de neerslag, de vochtigheid.

Isobaren zijn punten van gelijke druk. Hogedrukgebieden noemt men ook anticyclonen en lage drukgebieden noemt men depressies. Luchtcirculatie gaat steeds van hoge naar lage druk. Voor ons halfrond gaat de wind in wijzerszin rond een hogedrukgebied en in tegenwijzerszin rond een lage drukgebied.

Om correcte aflezingen van druk uit te voeren moeten we een aantal correcties en herleidingen invoeren

Correcties:

- uitzetting van de meetlat bij 15 °C
- druk uitgeoefend door kwikdamp
- capillariteitscorrectie

Herleidingen:

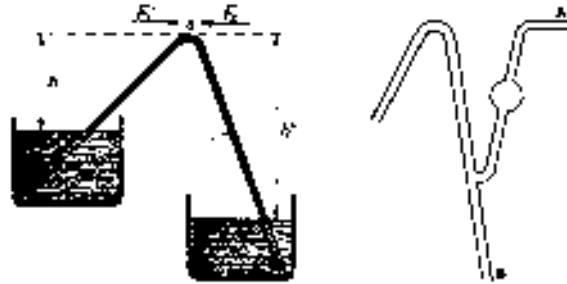
- reductie op 0 °C want kwik zet uit
- reductie op zeeniveau + 10.5 m bij -1 mm Hg
- herleiding op 45 graden NB want ook g verandert
($g = 9.806 \text{ N/kg}$)

6.2 Manometers

Dit zijn toestellen om de druk van een gas te meten. Er bestaan open en gesloten manometers.

Op de gasflessen gebruikt bij de lab proef staan ook manometers.

6.3 De hevel



Dit is een toestel om een vloeistof van een hoog vat naar een laag vat over te brengen zonder pompen. Men moet wel de darm volledig kunnen vullen.

6.4 Het pipet en het propipet

Deze toestellen dienen om chemische vloeistoffen op te nemen en zijn eveneens gesteund op drukverschillen. Het wordt in de chemie zeer veel gebruikt. (wijsvinger gebruiken!)

6.5 Pompen

Dit zijn toestellen om vloeistoffen of gassen op te pompen.

voor vloeistoffen

- zuigpomp
- zuigperspomp

voor gassen

- waterstraal pomp tot $1 \cdot 10^3$ Pa
- roterende vacuümpomp tot $1 \cdot 10^1$ Pa
- moleculair pomp voor hoog vacuüm tot $1 \cdot 10^{-3}$ Pa en lager

SAMENVATTING DRUK

DRUK OP VASTE STOFFEN

Druk is verhouding tussen kracht en oppervlakte

Een kracht veroorzaakt een vervorming van een vaste stof

Hoe groter de uitgeoefende kracht hoe groter de vervorming.

Is het oppervlak, waarop de kracht uitgeoefend wordt, klein dan is de vervorming groot.

Is het oppervlak, waarop de kracht uitgeoefend wordt, groot dan is de vervorming klein.

Wat is druk? Druk geeft de verhouding van de grootte van de uitgeoefende kracht tot de oppervlakte, op voorwaarde dat de kracht loodrecht uitgeoefend wordt op het oppervlak. In formule wordt dit: $p = F/A$

De eenheid voor druk is Pascal (Pa). Het is de druk die uitgeoefend wordt door een kracht van 1 Newton, die loodrecht inwerkt op een oppervlakte van 1 vierkante meter.

Materiaalspanning

Druk op vaste stoffen resulteert in een vervorming van die vaste stof.

Door die uitwendige druk ontstaat in de vaste stof een spanning die we materiaalspanning noemen. We maken daarbij onderscheid tussen drukspanning en trekspanning.

De materiaalspanning is het gevolg van de cohesiekrachten in een vaste stof.

DRUK OP EN IN VLOEISTOFFEN

Hoe verspreidt druk zich in een vloeistof?

Wanneer we een druk uitoefenen op een vloeistof geldt de wet van Pascal:

de druk die op een bepaald deel van een vloeistof wordt uitgeoefend, verspreidt zich in die vloeistof in alle richtingen en met dezelfde intensiteit.

Druk in een vloeistof: hydrostatische druk

De druk, die in een vloeistof heerst, noemen we de hydrostatische druk.

De hydrostatische druk is dezelfde in alle punten van een horizontaal vlak.

Hij neemt toe met de diepte.

De hydrostatische druk is afhankelijk van de aard van de vloeistof.

DRUK IN GASSEN

Aërostatistische druk of gasdruk

Een gas oefent een druk uit op elk oppervlak, waarmee het in aanraking komt. Deze druk noemt men aërostatistische druk of gasdruk. Hij wordt in alle richtingen uitgeoefend. De aërostatistische druk is het gevolg van botsingen, die snel vliegende gasmoleculen uitoefenen tegen de wanden.

Bestaan van de luchtdruk

Lucht is een mengsel van gassen. De druk die in de lucht heerst, noemen we luchtdruk of atmosferische druk.

Berekenen van de atmosferische druk

De atmosferische druk is gelijk aan 1013 hPa.

ARCHIMEDES KRACHT

Opwaartse kracht

Vloeistoffen en gassen oefenen een opwaartse kracht uit op een voorwerp dat (geheel of gedeeltelijk) ondergedompeld is. Die opwaartse kracht noemen we de Archimedes kracht.

Oorzaak van de Archimedes kracht

De Archimedes kracht is het gevolg van de hydrostatische kracht.

Hoe groot is de Archimedes kracht

Een lichaam dat ondergedompeld wordt in een vloeistof, ondervindt een opwaartse kracht. Daardoor verliest het voorwerp schijnbaar aan gewicht. De Archimedes kracht is afhankelijk van het volume van het lichaam en van de dichtheid van de vloeistof. De Archimedes kracht is gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

Zweven, drijven of zinken

Een lichaam zweeft als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof gelijk is aan het gewicht van het voorwerp.

Een lichaam drijft als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof groter is dan het gewicht van het voorwerp.

Een lichaam zinkt als de opwaartse kracht uitgeoefend door de vloeistof kleiner is dan het gewicht van het voorwerp.

ARBEID ENERGIE VERMOGEN

1 Wat is arbeid?

Als je aan arbeid denkt, dan denk je misschien aan werken. Arbeid wordt in de fysica exact gedefinieerd als volgt:

'arbeid verrichten is het uitoefenen van een kracht over een bepaalde afstand'

We weten nog dat een kracht F in N (Newton) wordt uitgedrukt. Het symbool voor afstand is s en wordt uitgedrukt in m (meter).

We kiezen als symbool voor arbeid W . In woorden 'arbeid is een kracht maal een verplaatsing'. De formule is dan:

$$W = F \cdot x$$

De eenheid van arbeid is dan $1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ J}$ (Joule)

Bovenstaande formule is alleen geldig als de kracht F evenwijdig is met de verplaatsing s . Vandaar dat we de formule voor arbeid zullen veralgemenen tot:

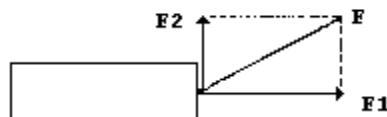
'de verrichtte arbeid is gelijk aan het produkt van de afgelegde weg met de projectie van de kracht op de richting van die weg'

In formulevorm wordt dat dan:

$$W = F \cdot x \cdot \cos \alpha$$

Bekijken we de onderstaande figuur dan zien we dat de kracht F in 2 componenten kan ontbonden worden nl. de kracht F_1 langs de verplaatsing en de kracht F_2 loodrecht op de verplaatsing.

We merken hierbij op dat alleen de kracht F_1 arbeid verricht. Dit kan ook uit de formule afgeleid worden door de hoek α te laten veranderen.



De bijzondere gevallen zijn:

$\alpha = 0^\circ$ $W = F \cdot x$ positieve of geleverde arbeid

$\alpha = 180^\circ$ $W = -F \cdot x$ negatieve of ontvangen arbeid

$\alpha = 90^\circ$ $W = 0$ geen arbeid

Het is duidelijk dat bij een werktuig de geleverde arbeid gelijk is aan de ontvangen arbeid mits we geen rekening houden met wrijvingskrachten en warmteverliezen. In werkelijkheid verliezen we met een werktuig altijd arbeid. Dit principe is niets anders dan de wet van behoud van arbeid.

In formule wordt dat: $W_1 + W_2 = 0$

met W_1 de geleverde arbeid en W_2 de ontvangen arbeid.

Schematisch

Arbeid is kracht maal verplaatsing, in formule $W = F \cdot x$

Positieve arbeid is geleverde arbeid

Negatieve arbeid is ontvangen arbeid

2 Wat is vermogen?

Veronderstel dat we een palet bakstenen naar de tweede verdieping moeten brengen.

Met de klas als iedereen meehelpt doen we daar een uur over. Met een hefkrans duurt het vijf minuten. De arbeid die moet verricht worden is in beide gevallen dezelfde.

Dit voorbeeld toont aan dat de tijd waarin je arbeid verricht ook een rol speelt.

We stellen het vermogen voor door het symbool P en definiëren dit als 'het vermogen is de arbeid verricht per tijdseenheid'. In formule wordt dit:

$$P = W / t$$

Vermits W in J en t in s zal $1 \text{ J} / 1 \text{ s} = 1 \text{ W}$ (Watt)

Door het invoeren van de Watt als eenheid van vermogen kunnen we nog een andere eenheid van arbeid gebruiken nl. de kWh, het kilowattuur

Uit de formule volgt dat $1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ J}$
daar $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ en $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

Misschien ken je nog een eenheid van vermogen nl. de pk. Deze eenheid mag eigenlijk niet meer gebruikt worden. Voor alle duidelijkheid, hij is gelijk aan 736 W.
($1 \text{ pk} = 736 \text{ W}$)

Om je een idee te geven van het begrip vermogen geven we hieronder de grootteorde van enkele vermogens:

- het menselijk hart: 2 W
- de mens zelf: 100 W
- een paard: 500 W
- een auto: 10000 W tot 1000000 W

LABPROEF

We bepalen het eigen vermogen door een trap te bestijgen. We berekenen de arbeid en meten de tijd.

Schematisch

Vermogen is arbeid per tijdseenheid, in formule $P = W / t$

3 Wat is energie?

Een levend wezen, ook de mens, bezit spierkracht. Met die spierkracht kan arbeid verricht worden.

Een levenloos voorwerp kan echter ook arbeid verrichten.

vb. - de wind doet de molenwieken draaien

- een waterval drijft een turbine aan

- een opgewonden veer doet een uurwerk gaan

Uit al deze voorbeelden is het duidelijk dat zowel levenloze als levende wezens de mogelijkheid hebben om arbeid te verrichten. We noemen deze mogelijkheid 'energie' hebben.

ENERGIE = ARBEID IN VOORRAAD

Als symbool voor energie gebruiken we E. De eenheid van energie is dezelfde als die voor arbeid nl. de J (Joule)

4 Arbeid bij een hoogteverandering in het zwaarteveld

Willen we een massa m op hoogte h brengen, dan moeten we een kracht F gelijk aan het gewicht van het lichaam verplaatsen.

$$\begin{aligned} & F = m \cdot g \\ \text{en} \quad & W = F \cdot s = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

$W = m \cdot g \cdot h$

De uitdrukking $m \cdot g \cdot h$ is kenmerkend voor de hoeveelheid arbeid die een lichaam dat zich op een hoogte h bevindt kan leveren door hoogtevermindering.

Men noemt de uitdrukking $E_p = m \cdot g \cdot h$ de potentiële energie. Is de hoogte $h = 0$ dan zal $E_p = 0$ zijn.

$$W = E_p$$

5 Arbeid bij snelheidsverandering

Een voorwerp met massa m in rust willen we een snelheid v geven. Daartoe moeten we op het voorwerp een constante kracht F laten inwerken. Zonder de wiskundige afleiding van de formules onthouden we dat de arbeid bij een snelheidsverandering gegeven wordt door:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

De uitdrukking $m \cdot v^2 / 2$ is kenmerkend voor de hoeveelheid arbeid dat een lichaam dat zich met een snelheid v voortbeweegt bezit.

Men noemt de uitdrukking $E_k = m \cdot v^2 / 2$ de kinetische energie.

Is $v = 0$ dan zal $E_k = 0$ zijn.

$$W = E_k$$

6 Energieomzettingen

Vermits er in theorie geen arbeid verloren gaat zal er ook geen energie verloren gaan, want arbeid is energie in voorraad.

We kunnen dit intuïtief inzien voor de valbeweging. Een vallend lichaam vermindert in hoogte, de potentiële energie vermindert. Het vallend lichaam vermeerderd in snelheid, de kinetische energie vermeerderd. Bij de valbeweging is de toename van de kinetische energie gelijk aan de afname van de potentiële energie.

De veralgemeende redenering is dan:

Energie kan ontstaan noch verdwijnen, ze kan alleen van de ene vorm in de andere vorm worden doorgegeven.

Een typisch voorbeeld is een waterkrachtcentrale.

De potentiële energie van het water wordt door het vallen omgezet in kinetische energie van het water. Deze energie doet de stang van een turbine draaien, die op zijn beurt de generator aandrijft. Deze generator levert elektrische energie die dan weer in andere energieën kan omgezet worden.

Het voorbeeld toont aan dat er verschillende vormen van energie zijn.

- de mechanische energieën nl. de potentiële en de kinetische energie
- de thermische energie
- de elektrische energie
- de stralingsenergie o.a. licht
- de massa-energie of kernenergie
- de chemische energie

Waar hoort zonne-energie dan bij?

Niet alle energie die we verbruiken is ook nuttig. Er gaat immers veel energie verloren door o.a. Warmteverliezen.

We voeren dan ook het rendement η in:

$$\text{rendement} = \frac{\text{nuttige energie}}{\text{verbruikte energie}}$$

Het rendement η is de verhouding van de nuttige energie tot de verbruikte energie. Het rendement is een getal tussen 0 en 1, maar wordt meestal in procent uitgedrukt. bv. een gloeilamp heeft een rendement van 15 %

Schematisch

Energie is arbeid in voorraad

Hoogteveranderingen veranderen de potentiële energie, in formule $E_p = m \cdot g \cdot h$
Snelheidsveranderingen veranderen de kinetische energie, in formule $E_k = m \cdot v^2 / 2$

Energie kan ontstaan noch verdwijnen, maar wordt van de ene vorm in de andere omgezet.

Het rendement is de verhouding van nuttige tot gebruikte energie

7 Vragen en opgaven

1 Hoeveel arbeid verricht de zwaartekracht, als een knikker over een horizontaal vlak rolt?

2 Hoe groot is de arbeid, door de zwaartekracht verricht, als een lichaam van 10 kg van een hoogte van 5 m valt?

3 Een man van 75 kg klimt met een zak cement van 50 kg op zijn rug in 20,0 s 12 m hoog op een ladder. Hoeveel arbeid heeft hij verricht en hoe groot is het ontwikkeld vermogen?

4 Een granaat van 20 kg verlaat de kanonloop met een snelheid van 600 m/s. Hoe groot is op dat ogenblik de kinetische energie van de granaat?

5 Een steen van 10 kg valt van een hoogte van 80 m. Met welke snelheid bereikt hij de grond? Wanneer de steen 2,0 m in de grond dringt en dat we aannemen, dat de weerstandskracht, die hij daarbij moet overwinnen constant is, hoe groot is die weerstand dan?

6 Een trein van 320 ton beweegt zich eenparig met een snelheid van 54 km/h. Bereken de kinetische energie van deze trein.

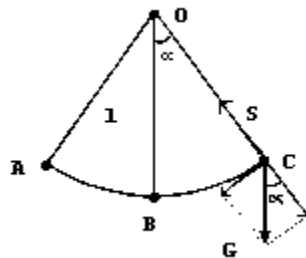
7 Een wagentje van 1000 kg op de foor komt van 95 m naar 55 m. Als het uit rust vertrekt welke zal dan zijn snelheid zijn op 55 m (wrijving verwaarlozen)?

8 Wat is een slinger?

Iedereen kent wel de slinger uit een slingeruurwerk. Dit is in feite een typisch voorbeeld van een voortdurend omzetten van potentiële energie naar kinetische energie en omgekeerd.

Een slinger bestaat uit een massa, opgehangen aan een draad, die een heen en weer gaande beweging uitvoert. We verklaren enkele begrippen:

- een slingering is de heen- en weergaande beweging
- de slingerlengte l
- de amplitude of uitwijkingshoek α
- de periode T is de tijdsduur van 1 slingering (merk op dat de periode van een secondeslinger $2s$ is)



In de punten A en C is de potentiële energie maximaal en de kinetische energie minimaal. $E_p = \text{maximaal}$ en $E_k = 0$

In het punt B is de kinetische energie maximaal en de potentiële energie minimaal. $E_k = \text{maximaal}$ en $E_p = 0$

Op de massa m werkt de zwaartekracht F_g .

Die kunnen we ontbinden in twee componenten nl.:

$F \cdot \cos \alpha$ en $F \cdot \sin \alpha$

Op de massa m werkt ook nog de kracht S , de spanning van de draad.

De krachten $F \cdot \cos \alpha$ en S de spanning in de draad heffen elkaar op. De werkende kracht is $F \cdot \sin \alpha$

Wetmatigheden waaraan de slinger voldoet

- de periode T is onafhankelijk van de grootte van de amplitude α als $\alpha < 36^\circ$
- de periode T is onafhankelijk van de massa
- de periode T is afhankelijk van de lengte l met $T^2 \sim l$
- de periode T is afhankelijk van g met $T^2 \sim 1/g$
- het slingervlak is onveranderlijk in de ruimte

Uit deze slingerwetten volgt de formule voor de slinger

$$T = 2\pi \cdot (l/g)^{1/2}$$

De formules voor l en g kun je hieruit afleiden!

Schematisch

Bij een slinger is er voortdurend energieomzetting.
De formule voor de periode van een slinger is:

$$T = 2\pi (l/g)^{1/2}$$

9 Vragen en opgaven

1 Bereken de lengte van een secondeslinger.

2 Een slinger doet 1000 slingeringen in 2004 s. De lengte bedraagt 994,2 mm.
Bereken g op die plaats.

3 Hoeveel slingeringen per minuut doet een slinger van 20 m lengte.

10 Werktuigen

10.1 Hefbomen

Bij hefbomen denk je meestal aan een koevoet die onder een zwaar voorwerp wordt geschoven en dan op een steunpunt wordt geplaatst om het zwaar voorwerp op te tillen. Daarnaast zijn er nog werktuigen die op hetzelfde principe steunen zoals kruiwagens, wiplanken, suikertangen, pincetten...

Vroeger verdeelde men de hefbomen in drie soorten nl. LSM, SLM, SML, naargelang het steunpunt in het midden, de last in het midden of de macht in het midden.

Dit heeft fysisch geen zin, want alles berust op de gulden regel van de mechanica nl. hetgeen men wint aan kracht verliest men aan afgelegde weg of omgekeerd.

Men noemt het moment van een kracht het product van de kracht en de afstand tot het steunpunt. Als symbool gebruikt men M en de eenheden zijn mN (meternewton)

$$M = F \cdot d$$

Een hefboom is in evenwicht zodra de som van de momenten, die een draaiing in wijzerszin (+) zouden veroorzaken gelijk is aan de som van de momenten die een draaiing in tegenwijzerszin zouden geven.

Kort gezegd:

de algebraïsche som van de momenten t.o.v. de steunas moet nul zijn.

10.2 Katrollen, takel en windas

Ook katrollen zijn bekende werktuigen die meestal dienen om een last omhoog te trekken.

Bij een vaste katrol is de macht gelijk aan de last $M = L$, er is dus geen winst.

Bij een losse katrol is de macht gelijk aan de helft van de last $M = L/2$ want er zijn hier in feite 2 katrollen

Bij een takel is $M = L/n$ met $n =$ som van het aantal vaste en losse katrollen

Bij een windas is de afgelegde weg gelijk aan de omtrek van de windas zodat de kracht kleiner wordt.

10.3 Hellend vlak

LABPROEF

Om een voorwerp omhoog te krijgen kan men het opheffen

$$W = G \cdot h$$

of men kan het een hellend vlak optrekken

$$W = F \cdot s$$

We kunnen dezelfde arbeid op twee manieren vinden, hij moet dus gelijk zijn.

Schematisch

Met werktuigen kan men arbeid verrichten, men verkleint de kracht door de afgelegde weg te vergroten.

11 Vragen en opgaven

1 Een wip is 5 m lang. Aan het ene uiteinde zit een meisje van 40 kg. Waar moet de vader met massa van 75 kg gaan zitten om haar in evenwicht te houden? (we houden geen rekening met de plank)

2 Een plank van 4,0 m lang, 60 cm breed en heeft een dikte van 5,0 cm ($\rho = 0,70 \text{ g/cm}^3$). Ze wordt gebruikt als springplank in een zwembad. De plank steekt 2,5 m over het water uit. Welke massa moet men op 30 cm van het uiteinde, op de oever plaatsen opdat een man van 120 kg aan de uiterste rand kan staan zonder dat de plank kantelt?

SAMENVATTING ARBEID - VERMOGEN - ENERGIE

- Wat is arbeid?

Arbeid is kracht maal verplaatsing, in formule $W = F \cdot s$

Positieve arbeid is geleverde arbeid

Negatieve arbeid is ontvangen arbeid

- Wat is vermogen?

Vermogen is arbeid per tijdseenheid, in formule $P = W / t$

- Wat is energie?

Energie is arbeid in voorraad

Hoogteveranderingen veranderen de potentiële energie, in formule $E_p = m \cdot g \cdot h$

Snelheidsveranderingen veranderen de kinetische energie, in formule $E_k = m \cdot v^2 / 2$

Energie kan ontstaan noch verdwijnen, maar wordt van de ene vorm in de andere omgezet.

Het rendement is de verhouding van nuttige tot gebruikte energie.

- Wat is een slinger?

Bij een slinger is er voortdurend energieomzetting.

De formule voor de periode van een slinger is:

$$T = 2\pi (l/g)^{1/2}$$

- Werktuigen

Met werktuigen kan men arbeid verrichten, men verkleint de kracht door de afgelegde weg te vergroten.

GASWETTEN

1 Wat we al weten over gassen

Veel meer dan je op het eerste gezicht zou denken. Zo weet je dat lucht een gas is en dat de luchtdruk te maken heeft met het weer. De atmosferische druk bedraagt ongeveer 1013 hPa, maar hij kan hogere en lagere waarden aannemen zodat gebieden van hoge en lage luchtdruk ontstaan.

Je bent er ook van op de hoogte dat gassen sterk samendrukbaar zijn, maar dat ze altijd het grootst mogelijke volume innemen. Gassen hebben dus een variabele druk en volume.

Je herinnert je ook dat de eenheid van druk (p) de pascal (Pa) is; de eenheid van volume (V) de m^3 en dat temperatuur (t) uitgedrukt wordt in graden Celsius ($^{\circ}C$).

Een mooie verzameling 'wetenschap'... of niet soms.

2 Volume en druk van een gas

PROEF

Zuig een hoeveelheid lucht op in een meetspuit (thuis kan je de proef overdoen met een plastic wegwerpspuit of een fietspomp). Sluit de opening af met de vinger en druk de zuiger zo dicht mogelijk tot bij de pompbodem.



Waarneming

Je kan het volume van een gas verkleinen maar dat gaat niet gemakkelijk! Hoe meer je de zuiger wil indrukken, hoe meer kracht je moet uitoefenen (er mag natuurlijk geen ingesloten lucht ontsnappen).

Verklaring

Voortdurend wordt de zuiger (evenals de wanden van de meetspuit) gebombardeerd door gasdeeltjes, die met grote snelheid in de cilinder bewegen, zigzag door elkaar. Al deze botsingen resulteren in een druk in de meetspuit.

Om je er een idee van te geven: het aantal botsingen op elke vierkante centimeter van de zuiger of de wanden van de pomp, bedraagt ongeveer $10^{23}/s$.

Besluit

Wanneer je de druk op een gas laat toenemen, verkleint het volume.

Toepassingen

- Als je met twee op een fiets zit, worden de banden meer platgedrukt dan wanneer je alleen bent. Hetzelfde doet zich voor op een luchtmatras.
- Op een springkasteel veranderen druk en volume voortdurend.
- In gasflessen (propana, butaan, zuurstofgas...) wil men een grote hoeveelheid gas bewaren. Omdat het volume van zo'n fles klein is, kan dat alleen als de druk op het gas heel groot is. Zo wordt zuurstofgas geleverd in stalen flessen met een (inwendig) volume van 1 m^3 en met een druk van 20 MPa.

Schematisch

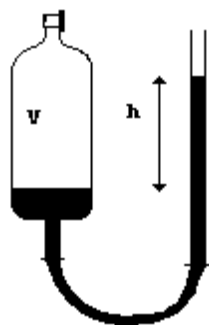
Naarmate het volume van een ingesloten hoeveelheid gas afneemt, wordt de druk ervan groter.

3 De volumedruk wet

Als de druk stijgt dan daalt het volume. Als het volume groter wordt dan wordt de druk kleiner. Er is dus duidelijk een verband tussen druk en volume en dat verband willen we nu bestuderen.

LABPROEF

Het toestel (zie tekening) wordt gevuld met kwik tot op een bepaalde hoogte: het kwikniveau in de glazen buizen A en B is nu gelijk. Op dat moment heerst er op de beide vloeistofoppervlakken een druk van ongeveer 1013 hPa (dit komt overeen met 76 cm kwik). We sluiten het kraantje van buis A af, zodat een bepaald volume lucht opgesloten zit.



Wanneer we daarna de buis B omhoog bewegen zien we dat zowel in A als in B het kwikniveau stijgt. In buis A duiden we het niveau aan met 'a' en in buis B met 'b'.

Naarmate we de buis B nog hoger bewegen, wordt het niveauverschil tussen a en b stelselmatig groter.

Waarneming

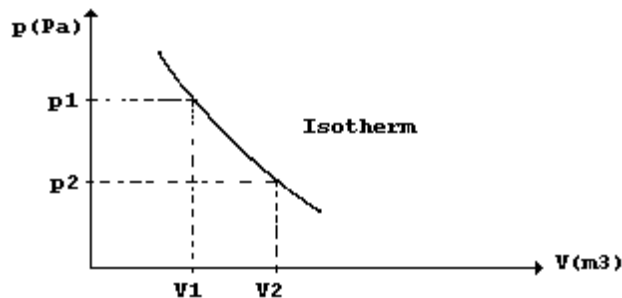
Het volume van de ingesloten lucht wordt kleiner en de druk ervan groter. We noteren onze waarnemingen in een tabel; het volume drukken we uit in ml, de druk in cm (zoals we ze bij de proefopstelling kunnen aflezen). Dat zijn natuurlijk niet de standaardeenheden, maar voor de resultaten van de proef maakt dit niets uit.

V (ml) | p (cm) | p.V (cm.ml)

34	76 + 0	2584
32	76 + 3	2528
30	76 + 8	2520
28	76 + 14	2520

In de tweede kolom betekent het eerste cijfer de atmosferische druk (in cm kwik) en het tweede cijfer het hoogteverschil tussen a en b. Je ziet dat in de derde kolom de resultaten nagenoeg gelijk zijn.

Wanneer we de resultaten uitzetten in een p(V)-diagram dan bekommen we geen rechte, maar een hyperbool.



Besluit

Het product van de druk en het volume van een ingesloten hoeveelheid gas is constant.

In formulevorm kunnen we dit als volgt noteren:

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

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

Deze wet, die we ook de wet van Boyle-Mariotte noemen, is enkel geldig voor een hoeveelheid gas waarvan de temperatuur niet verandert. De lijn in de grafiek is een isotherm (dat is een lijn van gelijke temperatuur).

Schematisch

Voor een bepaalde hoeveelheid gas is het produkt van druk en volume constant bij een welbepaalde temperatuur.

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

Dat is de wet van Boyle-Mariotte.

4 We veranderen de temperatuur van een gas

PROEF

We nemen een kolf (die uiteraard gevuld is met lucht) en sluiten hem af met een doorboorde stop. Door de opening steekt een gebogen glazen buisje (zie tekening), waarvan het uiteinde ondergedompeld is in water. We verwarmen de kolf met onze handen.



Waarneming

Je ziet luchtballen opstijgen in het water.

Verklaring

Door het verwarmen neemt het volume van de ingesloten lucht toe, zodat hij opborrelt uit het water.

Besluit

Wanneer we de temperatuur van een gas veranderen, wijzigt het volume.

PROEF

We vullen een manometer met gekleurd water en verbinden die met een kolf, die gevuld is met lucht. We verwarmen de kolf opnieuw met onze handen.



Waarneming

Aan de kant van de kolf wordt het water naar beneden gedruwd, zodat het water in het andere been stijgt.

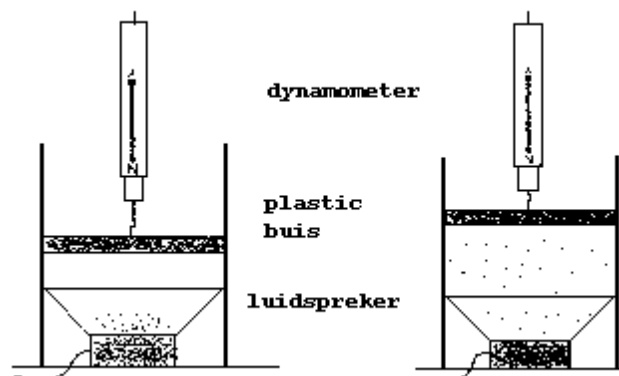
Verklaring

Bij een voorgaande proef hebben we al verteld dat gasdeeltjes met een grote snelheid, kriskras door elkaar bewegen en dat ze daardoor druk uitoefenen. Wanneer we de temperatuur van het gas verhogen, neemt de snelheid van de gasdeeltjes toe. Daardoor gaan ze meer botsen, zodat de druk toeneemt. Het leuke van deze verklaring is dat we ze staven met nog een mooie proef.

PROEF

Een luidspreker wordt met de conus naar boven geplaatst, zoals de figuur aantoont. In de conus leggen we een handvol plastic pareltjes. Daarna schuiven we een passende, doorzichtige (anders zien we niets) plastic buis over de luidspreker. Aan een dynamometer hangen we een horizontaal plaatje, dat in de plastic buis past. We noteren de grootte van de kracht.

We sluiten de luidspreker aan op een wisselstroombron, waardoor de conus hevig begint te trillen.



Waarneming

- De pareltjes vliegen in heftige beweging door elkaar en botsen voortdurend op de wanden, op het plaatje en op elkaar.
- De aanduiding op de dynamometer verandert: de kracht wordt kleiner.

Verklaring

Al die botsingen van de pareltjes resulteren in een druk op het plaatje, waardoor het omhoog gedruwd wordt. Daardoor wordt de aanduiding op de dynamometer kleiner.

We verhogen de stroomsterkte van de wisselstroom.

Waarneming

De aanduiding op de dynamometer wordt nog kleiner.

Verklaring

De pareltjes vliegen nog sneller door elkaar, zodat het aantal botsingen toeneemt. Het plastic plaatje wordt daardoor nog meer omhooggeduwd.

We kunnen die bewegende pareltjes vergelijken met bewegende gasdeeltjes en het verhogen van de stroomsterkte komt overeen met een temperatuursverhoging. Op die manier hebben we visueel kunnen aantonen dat verhogen van de temperatuur de gasdeeltjes sneller doet bewegen. Daardoor wordt de druk groter.

Besluit

Wanneer we de temperatuur van een gas veranderen, wijzigt ook de druk.

Toepassingen

- In een luchtballon wordt de lucht verhit door een brander. Daardoor neemt het volume van die lucht toe. De verwarmde lucht heeft daardoor een lagere dichtheid dan de omgevende lucht en de ballon stijgt langzaam en statig op.
- Bij elke arbeidsslag in de cilinder van een motor wordt er benzine verbrandt. Hierbij wordt er onder andere koolstofdioxide (CO_2) gevormd. Bovendien neemt de temperatuur zo sterk toe dat het gasvolume veel groter wordt. De zuiger wordt dan weggeduwd en doet de nokkenas draaien.
- Bij het ontploffen van dynamiet ontstaat een grote hoeveelheid gas. Door de bijkomende temperatuurstijging neemt dat gasvolume sterk toe. Dit gebeurt allemaal zo vlug dat we een knal horen.
- Een spuitbus mag je nooit verwarmen: de druk van het ingesloten gas zou zo hoog worden dat de bus explodeert.
- Als je een fiets waarvan de banden stevig opgepompt zijn, lange tijd in de felle zon laat staan, kan de gasdruk in de banden zo hoog worden dat ze springen.

Schematisch

De temperatuur heeft een invloed op het volume en op de druk van gassen.

5 Absolute temperatuur

De vorige proef heeft ons geleerd dat gasdeeltjes sneller bewegen als de temperatuur toeneemt. Als we daarentegen de temperatuur laten afnemen, zullen de gasdeeltjes steeds trager bewegen: de gasdruk wordt dan stelselmatig kleiner.

Nu kunnen we de temperatuur van een gas niet blijven verlagen. De beweeglijkheid van de deeltjes wordt steeds kleiner zodat het gas eerst omgezet wordt in een vloeistof en bij nog lagere temperatuur in een vaste stof.

Op een gegeven moment is de temperatuur zo laag geworden dat de deeltjes alle energie ontbreken om nog te bewegen. We zeggen dat de allerkoudste temperatuur bereikt is. We noemen dat het absolute nulpunt.

Uit talloze metingen en berekeningen weten we dat het absolute nulpunt gelijk is aan $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Een lagere temperatuur bestaat niet!!

Temperatuur gerekend vanaf het absolute nulpunt noemen we absolute temperatuur. Ze wordt gesymboliseerd door de letter 'T' en uitgedrukt in Kelvin (symbool: 'K').

Graden Celsius omzetten in Kelvin en omgekeerd is heel eenvoudig. We demonstreren het met dit tabelletje.

t($^{\circ}\text{C}$)	-273	0	10	100

T(K)	0	273	283	373

Je vindt de absolute temperatuur door de temperatuur in graden Celsius te vermeerderen met 273.

$$T = t + 273$$

Omgekeerd vind je de temperatuur in graden Celsius door 273 af te trekken van de absolute temperatuur.

$$t = T - 273$$

Tot slot geven we nog enkele voorbeelden.

t($^{\circ}\text{C}$)	T(K)
-------------------------	------

lichaamstemperatuur	37	310
vloeibare stikstof	-196	77
vloeibare waterstof	-253	20
vloeibare helium	-268	5

Schematisch

$-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ is de laagst mogelijke temperatuur. We noemen dit het absolute nulpunt.

Temperatuur gerekend vanaf het absolute nulpunt, noemen we de absolute temperatuur. Het symbool ervan is 'T' en ze wordt uitgedrukt in Kelvin (K).

Omrekenen van graden Celsius in Kelvin en omgekeerd gaat heel gemakkelijk:

$$T = t + 273$$

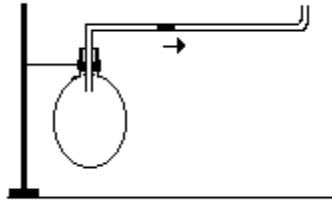
$$t = T - 273$$

6 Volumetoename bij constante druk: volumetemperatuur wet

We weten al dat temperatuur een invloed uitoefent op druk en volume van een gas. Het spreekt vanzelf dat we de invloed van de temperatuur op bijvoorbeeld de druk alleen, maar goed kunnen voorspellen als we niet tegelijkertijd ook andere factoren wijzigen. Daarom bestuderen we eerst de verandering van het volume als de druk constant blijft. In een van de volgende paragrafen gaan we dan kwantitatief de invloed van de temperatuur op de druk van een gas bestuderen, als het volume constant blijft.

PROEF

We nemen een kolf en sluiten hem af met een doorboorde kurk. De kolf bevat lucht. Door de kurk zit een glazen buis, met daarin een kwikdruppel (zie tekening). Deze kwikdruppel sluit de lucht af in de kolf. Vermits de buis aan een kant open is, blijft de druk constant (= atmosferische druk op het moment van de proef). We verwarmen nu de kolf in een warmwaterbad of met onze handen.



Waarneming

De kwikdruppel verschuift naar rechts in de buis.

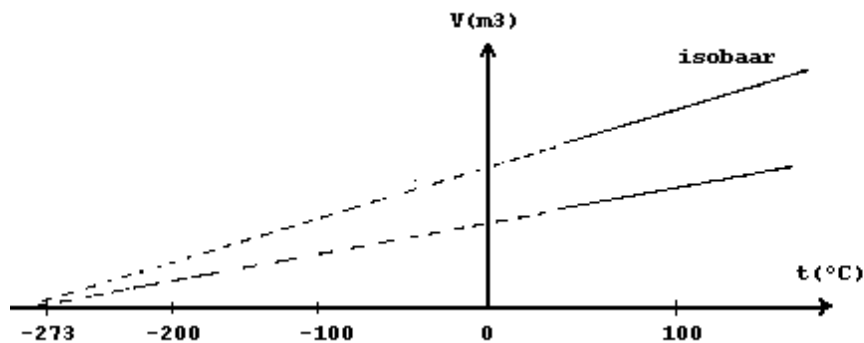
Besluit

Het volume neemt toe als de temperatuur toeneemt. Uit meer nauwkeurige metingen blijkt dat het volume evenredig is met de absolute temperatuur.

In formulevorm kunnen we het neerschrijven als:

$$V = \text{constante} \times T$$

Wanneer we onze waarnemingen uitzetten in een $V(t)$ -diagram dan bekomen we een rechte. Deze rechten noemen we een isobaar. Dit is een lijn van gelijke druk.



Schematisch

Het volume van een gas neemt toe als de temperatuur stijgt.

Deze volumetoename is niet willekeurig, maar wordt gegeven door de formule:

$$V = \text{constante} \times T$$

7 Voor wie graag rekent

Uit de proef kunnen we meer afleiden dan alleen dat het volume van een gas groter wordt naarmate de temperatuur toeneemt. Inderdaad, wanneer we het gas verder verwarmen, blijft het volume toenemen. Wiskundig uitgedrukt, klinkt dat als:

- de volumetoename (dV) is recht evenredig met de temperatuurtoename (dt).

$$dV \sim dt$$

- Bovendien is het ook zo dat de volumetoename afhankelijk is van het beginvolume. Het is zonder meer duidelijk dat een grotere kolf meer gas bevat, dat dus meer kan toenemen in volume. Strikt wetenschappelijk wordt het beginvolume altijd vastgelegd bij een temperatuur van 0°C (= 273 K). Anders gezegd: de volumetoename (dV) is recht evenredig met het beginvolume (V_0) bij 0°C .

$$dV \sim V_0$$

Hieruit volgt in formulevorm:

$$dV \sim V_0 \cdot dt$$

We kunnen deze uitdrukking ook schrijven als:

$$dV = \text{constante} \cdot V_0 \cdot dt$$

Die constante noemen we de volumecoëfficiënt van het gas en we stellen hem voor met het symbool ' α '. De formule wordt daardoor:

$$dV = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$$

Alfa is eigenlijk een klein mirakel, want onderzoek van deze volumecoëfficiënt voor verschillende gassen gaf telkens dezelfde waarde, welk gas er ook genomen werd. Ze is namelijk gelijk aan:

$$\alpha = 1 / 273 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 0,0037 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

We kunnen nog verder sleutelen aan onze formule. Wanneer we immers dV vervangen door $(V - V_0)$ krijgen we:

$$V - V_0 = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$$

Bovendien is $dt = t - t_0 = t - 0 = t$

Daaruit volgt dat:

$$V = V_0 (1 + \alpha \cdot t)$$

Anders gezegd: deze formule laat ons toe om te berekenen hoe groot het volume van een bepaald gas is bij een bepaalde temperatuur.

We kunnen nu deze gaswet in functie van T uitdrukken: vervangen we in de voorgaande formule t door T - 273 dan

$$\begin{aligned}
 V &= V_0(1 + \alpha.t) \\
 &= V_0 [1 + 1/273(T - 273)] = V_0(1 + T/273 - 1) \\
 &= \frac{V_0}{273} \cdot T
 \end{aligned}$$

of $V = \text{constante} \cdot T$

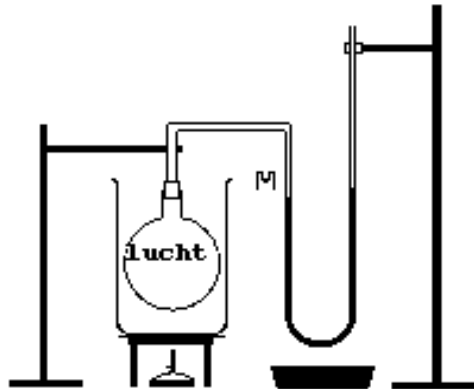
8 Druktoename bij constant volume: de druktemperatuur wet

Om de invloed van de temperatuur op de druk te bestuderen, kiezen we een opstelling waarbij het volume constant gehouden wordt.

PROEF

Een glazen kolf (gevuld met lucht) is, via een rubberdarm gevuld met kwik, verbonden met een rechtopstaande glazen buis.

Op dit moment moet het kwikniveau in linker en rechter buis gelijk zijn. Aan de linkerkant duiden we dit kwikniveau aan met een merkstreep (M).



We verwarmen de kolf in een warmwaterbad (traag!). Het volume van de lucht neemt toe zodat het kwikniveau links naar beneden geduwd wordt.

Wanneer we echter de rechterbuis omhoog bewegen kunnen we ervoor zorgen dat het kwikniveau terug op de merkstreep M komt te staan. Op die manier bereiken we dat het volume van de ingesloten lucht gelijk blijft.

Het kwikniveau in de linker en rechter buis is nu echter wel verschillend. De druk van de ingesloten lucht is dus toegenomen en is gelijk aan de som van de atmosferische

druk (af te lezen op het moment van de proef en ongeveer gelijk aan 76 cm kwikdruk) en het hoogteverschil tussen de beide niveaus.

Onze meetresultaten zetten we in een tabel. In de beide eerste kolommen staat de temperatuur uitgedrukt in graden Celsius en in Kelvin. In de derde kolom staat het hoogteverschil tussen de kwikniveaus. De vierde kolom toont de totale druk en in de vijfde kolom hebben we de verhouding p/T berekend.

Waarneming

°C	K	hoogteverschil(cm)	totale druk(cm)	p/T
20	293	0.8	$76.0 + 0.8 = 76.8$	0.26
25	298	1.7	$76.0 + 1.7 = 77.7$	0.26
30	303	2.6	$76.0 + 2.6 = 78.6$	0.26
35	308	3.4	$76.0 + 3.4 = 79.4$	0.26
40	313	5.4	$76.0 + 5.4 = 81.4$	0.26
45	318	7.2	$76.0 + 7.2 = 83.2$	0.26
50	323	9.8	$76.0 + 9.8 = 85.5$	0.26

Besluit

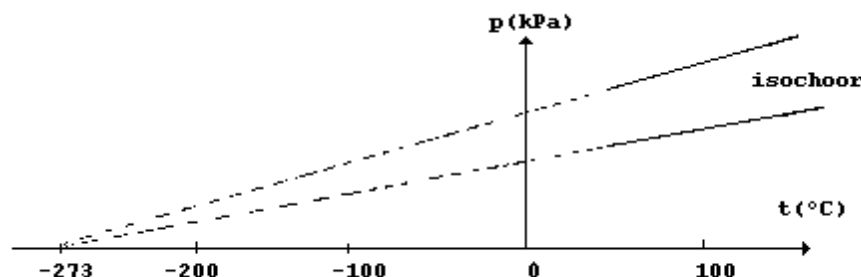
Het is erg opvallend dat de verhouding p/T constant is. Dit betekent dat de druk evenredig is met de absolute temperatuur. In formule wordt dat:

$$p = \text{constante} \times T$$

Dit kunnen we schrijven als:

$$\frac{p}{T} = \text{constante} \quad \text{of} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Wanneer we onze waarnemingen in een $p(T)$ -diagram uitzetten, dan bekommen we een rechte. Deze rechte noemen we een isochoor (dit is een lijn van gelijk volume)



Schematisch

De druk van een gas neemt toe als de temperatuur stijgt.

Tussen druk en absolute temperatuur bestaat er een constante verhouding, gegeven door de formule:

$$\frac{p}{T} = \text{constante} \quad \text{of} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

9 Nog meer rekenwerk

Uit de meetresultaten van de proef kunnen we het volgende besluiten:

- hoe meer de temperatuur toeneemt, hoe groter de druk wordt of de druktoename dp is evenredig met de temperatuurtoename dt

$$dp \sim dt$$

- de druktoename is afhankelijk van de begindruk. Deze wordt ook bepaald bij een temperatuur van 0°C (= 273 K). Anders gezegd: de druktoename dp is evenredig met de begindruk p_0 bij 0°C .

$$dp \sim p_0$$

Hieruit volgt in formulevorm

$$dp \sim p_0 \cdot dt$$

We kunnen dit ook schrijven als:

$$dp = \text{constante} \cdot p_0 \cdot dt$$

Die constante is de druk coëfficiënt van het gas en we stellen hem voor door het symbool ' β '. Daardoor wordt dp gelijk aan:

$$dp = \beta \cdot p_0 \cdot dt$$

Onderzoek van de druk coëfficiënt voor verschillende gassen leverde voor alle gassen dezelfde waarde.

$$\beta = \frac{1}{273} = 0,0037 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Wanneer we nu hetzelfde rekenwerk verrichten als in de voorgaande paragraaf vinden we voor p :

$$p = p_0 (1 + \beta \cdot t)$$

Het is dus ook mogelijk om de grootte van de druk te berekenen bij een bepaalde temperatuur. α en β zijn dus nog grotere mirakels, want ze zijn gelijk aan elkaar.

De gaswet bij constant volume kan nu ook wiskundig uit de formule afgeleid worden.

Vervangen we in de gevonden formule $t = T - 273$

$$p = p_0(1 + \beta \cdot t)$$

$$= p_0 [1 + 1/273(T - 273)] = p_0 (1 + T/273 - 1)$$

$$\text{of } p = \frac{p_0}{273} \cdot T$$

$p = \text{constante} \cdot T$ bij $V = \text{constante}$

10 De algemene gaswet

De wet van Boyle-Mariotte geeft het verband tussen druk en volume als de temperatuur constant blijft. We hebben daarnaast een wet leren kennen die het verband tussen druk en temperatuur vastlegt als het volume constant gehouden wordt. Tenslotte hebben we ook de volumetemperatuur wet bestudeerd, bij constante druk.

In het dagelijks leven zullen, in de meeste gevallen, alle factoren gelijktijdig veranderen.

We geven enkele voorbeelden.

- Als een opgepompte fietsband lang in de zon staat, wordt de temperatuur ook binnenin erg hoog. De druk stijgt daardoor. Bovendien is rubber rekbaar en wordt het volume van de ingesloten lucht groter onder invloed van de verhoogde temperatuur.
- De jongedame op de tekening is zich misschien nog niet bewust van het gevaar; maar erg prettig ziet er haar toekomst niet uit!! Door het al te lang zonnen zijn druk en volume van de lucht in de luchtmatras zo groot geworden dat de knal waarschijnlijk niet lang meer op zich zal laten wachten.



Ook wanneer de drie factoren (p, V, T) tegelijk veranderen, bestaat er een constant verband. Alleen de massa moet constant blijven. Er mag dus geen gas bijkomen of weglekken. Dit verband wordt vastgelegd door de algemene gaswet. Hij ziet er zo uit:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{constante} \quad \text{of} \quad \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Je merkt dat de algemene gaswet in feite de combinatie is van de drie gaswetten, die we bestudeerd hebben.

Schematisch

Tussen druk (p), volume (V) en temperatuur (T) van een gas bestaat er een verband, gegeven door de algemene gaswet.

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{constante} \quad \text{of} \quad \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

11 De gasconstante

De algemene gaswet kunnen we ook schrijven als:

$$p \cdot V = \text{constante} \cdot T$$

Voor 1 mol van een gas noemen we die constante de gasconstante en we stellen ze voor door het symbool 'R'. Voor 1 mol van een gas geldt er dus:

$$p \cdot V = R \cdot T$$

Voor n mol gas wordt dat:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

De gasconstante R berekenen is een koud kunstje. Een mol van gelijk welk gas neemt een volume van 22,4 l (0,0224 m³) in bij een temperatuur van 0°C (273 K) en een druk van 1013 hPa (101300 Pa). Wanneer we deze waarden invoeren in de formule wordt dit:

$$R = \frac{101300 \cdot 0,0224}{273} = 8,31 \text{ J/mol K}$$

11 Nog meer...

We merken op dat deze gaswet geldt voor ideale, dit zijn sterk verdunde gassen. Bij andere gassen geldt de wet van Van Der Waals.

$$(p + a/V^2) (V - b) = \text{constante}$$

met a en b twee constanten afhankelijk van de aard en het eigen volume van het gas. Deze wet wordt hier niet bestudeerd.

We merken eveneens op dat uit de formule $p = p_0(1 + \beta \cdot t)$ en het p(t)-diagram het volgende blijkt:

Zoeken we het snijpunt van de rechte met de t-as, dan moeten we $p = 0$ stellen.

$$\text{of } 1 + \beta \cdot t = 0$$

Bij $p = 0$ liggen alle moleculen stil en is er geen beweging en dus ook geen druk meer.

De temperatuur waarbij dit verschijnsel zich voordoet bekomt men door t op te lossen uit:

$$1 + \beta \cdot t = 0$$

$$\text{of } \beta \cdot t = -1 \quad t = -1/\beta = -273 \text{ }^\circ\text{C}$$

Deze temperatuur is niets anders dan het absoluut nulpunt.

12 Vragen en opgaven

- 1 Als we een opgeblazen voetbal in de zon leggen, geldt dan de wet van Boyle-Mariotte?
- 2 In een vat van 2,0 l bevindt er zich lucht onder een druk van 300 hPa bij een temperatuur van 10°C. Tot welke temperatuur moet de lucht verwarmen opdat een druk van 500 hPa zou bereikt worden?
- 3 Een vat, afgesloten met een verplaatsbare zuiger, bevat 10 l lucht bij een temperatuur van 20°C en bij een druk van 10⁵ Pa. Tot welke temperatuur (in Kelvin) moeten we het vat verwarmen opdat het volume zou verdubbelen. De druk wordt constant gehouden.
- 4 Een luchtvaartballon, gevuld met heliumgas, staat op de grond waar de temperatuur op dat moment 20°C bedraagt en de druk 1013 hPa. Het volume van de ballon is 384,6 m³. Hoe groot zal dat volume worden wanneer de ballon opstijgt tot een hoogte van 4000 m waar de temperatuur 0°C bedraagt en de druk 731,9 hPa is?

13 Massadichtheid van een gas

We kunnen de algemene gaswet ook als volgt noteren:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_n \cdot V_n}{T_n}$$

met de index n voor normaalomstandigheden

nl. $T_n = 273 \text{ K}$, $p_n = 101300 \text{ Pa}$ en voor $m = M = 1 \text{ mol}$ is $V_n = 22,4 \text{ l}$

$$\rho_n = \frac{m}{V_n} = \frac{M}{V_n} = \frac{M}{22,4 \text{ l}} \quad \left(\text{of } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\text{en } \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{p_n \cdot V_n \cdot T} \cdot p \cdot T_n = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{p_n \cdot T}$$

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{p_n \cdot T}$$

Voorbeeld

ρ_n (lucht) = 1,293 kg/m³ bereken dit !!!

Opgave

Wat is ρ (lucht) als $p = 1020$ hPa en $t = 27^\circ\text{C}$?

Dan is $p = 102000$ Pa en $T = 27 + 273 = 300$ K

$$\text{of } \rho = 1,293 \cdot \frac{102000}{101400} \cdot \frac{273}{300} = 1,293 \cdot 1,0069 \cdot 0,91 \\ = 1,184 \text{ kg/m}^3$$

14 Absolute dichtheid van een gas

De absolute dichtheid van een gas is de verhouding van de dichtheid van het gas t.o.v. de dichtheid van lucht

$$\rho^* = \frac{\rho(\text{gas})}{\rho(\text{lucht})} = \frac{\rho_n(\text{gas})}{\rho_n(\text{lucht})}$$

met ρ^* onbenoemd

$$\rho^*(\text{lucht}) = 1$$

ρ^* afhankelijk van de aard van het gas

$$\rho^* = \frac{M}{22.4} = \frac{M}{29.0}$$

Voorbeeld

$$\rho^*(\text{zuurstof}) = 32/29.0 = 1.10$$

15 Massa van een gas

Kennen we de dichtheid van een gas dan kunnen we de massa van een gas bepalen!

$$\text{Uit } \rho(\text{gas}) = \rho(\text{lucht}) \cdot \rho^*$$

$$\text{en } m(\text{gas}) = \rho(\text{gas}) \cdot V = \rho(\text{lucht}) \cdot \rho^* \cdot V$$

$$= \rho_n(\text{lucht}) \cdot p/p_n \cdot T_n/T \cdot \rho^* \cdot V$$

vinden we

$$m(\text{gas}) = 1,293 \cdot \rho^* \cdot V \cdot p/p_n \cdot T_n/T$$

Voorbeeld

Bereken de massa lucht in het fysicalokaal

$$\rho^*(\text{lucht}) = 1 \quad V = 10 \times 7 \times 3 = 210 \text{ m}^3$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$p = 1020 \text{ hPa}$$

$$m(\text{gas}) = 1.293 \times 1 \times 210 \times 1020/1014 \times 273/293 = 254.7 \text{ kg}$$

16 Vragen en opgaven

1 Wat zal in hetzelfde lokaal de grootste massa hebben? Het lokaal gevuld met lucht of het lokaal gevuld met zuurstofgas?

2 Een metalen vat van 821 l bevat een hoeveelheid zuurstofgas bij een temperatuur van 127°C en een druk van 200 hPa.

a) bereken het aantal gram zuurstof in het vat

b) bereken de massadichtheid van deze zuurstof

3 Bereken de massa van 1000 cm³ waterstofgas op 50°C en onder een druk van 2.10⁵ Pa (bereken zelf de dichtheid)

4 In een stalen fles heeft men waterstofgas bij een temperatuur van 15,0 °C en een druk van 12000 hPa. Na gebruik van deze waterstof leest men een druk af van 9800 hPa. De temperatuur is op dat ogenblik 22,0 °C. Hoeveel g gas heeft men op dat ogenblik verbruikt en welk volume zou dat innemen bij 22 °C en 100 hPa druk? (volume fles = 25,0 l en $\rho^*(\text{waterstof}) = 0.0696$)

17 Druk in gasmengsels

Een druk uitgeoefend op een gas verspreidt zich ongewijzigd in alle richtingen. Dit betekent dat de wet van Pascal geldig blijft.

Drukken we een gas samen, dan zal het volume verminderen en omgekeerd. Het product van de druk p en het volume V van een gas is constant, men noemt dit de volumedruk wet.

Dit betekent dat:

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

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

Hierbij zijn de indexen 1 en 2 resp. twee verschillende toestanden van het gas.

Wet van Dalton in een gasmengsel

Beschouwen we twee gassen in twee verschillende vaten bij twee verschillende drukken. Wat is hun gezamenlijke druk?

Veronderstel dat p_1 en p_2 en V_1 en V_2 hun respectievelijke drukken en volumes zijn. We veranderen de volumes tot ze dezelfde druk hebben

$$V_1' = \frac{p_1 \cdot V_1}{p} \quad V_2' = \frac{p_2 \cdot V_2}{p}$$

We stellen dan de vaten in verbinding zodat

$$V = V_1' + V_2'$$

$$V = \frac{p_1 \cdot V_1}{p} + \frac{p_2 \cdot V_2}{p}$$

of $p \cdot V = p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2$

$$\text{of } p = \frac{p_1 \cdot V_1}{V} + \frac{p_2 \cdot V_2}{V}$$

of $p = p_1' + p_2'$ dit is de wet van Dalton

Hierbij zijn p_1' en p_2' de partiële drukken alsof dit gas alleen het totale volume V inneemt

Bij constante temperatuur is de druk van een gasmengsel gelijk aan de som van de partiële drukken die elk gas zou verkrijgen als het alleen het volume van het mengsel innam.

18 Vragen en opgaven

- 1 Een gas heeft een volume van 12 liter en een druk van 0,20 MPa. Bereken de druk die het gas krijgt, als men het volume bij constante temperatuur verkleint tot 8,0 liter.
- 2 Een hoeveelheid lucht van 25 dm^3 is opgesloten in een cilinder onder een zuiger van 5 dm^2 oppervlakte. De luchtdruk is 0.14 MPa. Bereken de druk van de lucht in de cilinder wanneer men de zuiger 2 dm ophaalt.
- 3 In een luchtlede ruimte van 20 liter brengt men achtereenvolgens 10 liter gas met een druk van 0.50 MPa; 15 liter gas met een druk van 0.80 MPa en 12 liter met een druk van 2,0 MPa. Bereken de einddruk van het gasmengsel als de gassen dezelfde temperatuur hebben en deze tijdens het mengen ook niet verandert.
- 4 Een ruimte van $2,0 \text{ m}^3$ bevat lucht met een druk van 0,50 MPa. Men haalt uit de ruimte eerst $1,0 \text{ m}^3$ van 0,10 MPa en daarna 2 m^3 van 0,20 MPa. Bereken de einddruk in de ruimte.

SAMENVATTING GASWETTEN

- Volume en druk van een gas

Naarmate het volume van een ingesloten hoeveelheid gas afneemt, wordt de druk ervan groter.

- De volumedrukwet

Voor een bepaalde hoeveelheid gas is het product van druk en volume constant bij een welbepaalde temperatuur.

$$p \cdot V = \text{constante bij constante temperatuur}$$

Dit is de wet van Boyle-Mariotte.

- Temperatuur van een gas

De temperatuur heeft een invloed op het volume en op de druk van gassen.

- De absolute temperatuur

-273 °C is de laagst mogelijke temperatuur. We noemen dit het absolute nulpunt.

Temperatuur gerekend vanaf het absolute nulpunt, noemen we de absolute temperatuur. Het symbool ervan is 'T' en ze wordt uitgedrukt in Kelvin (K).

Omrekenen van graden Celsius in Kelvin en omgekeerd gaat heel gemakkelijk:

$$T = t + 273$$

- Volumetoename bij constante druk

Het volume van een gas neemt toe als de temperatuur stijgt.

Deze volumetoename is niet willekeurig, maar wordt gegeven door de formule: $V = \text{constante} \cdot T$

- Druktoename bij constant volume

De druk van een gas neemt toe als de temperatuur stijgt.

Tussen druk en absolute temperatuur bestaat er een constante verhouding, gegeven door de formule: $p = \text{constante} \cdot T$

- De algemene gaswet

Tussen druk (p), volume (V) en temperatuur (T) van een gas bestaat er een verband, gegeven door de algemene gaswet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

WARMTE EN FASE-OVERGANGEN

1 TEMPERATUUR EN WARMTE

1.1 Het begrip temperatuur

Warmte is een begrip dat we allen goed kennen. Warmte kan op verschillende manieren ontstaan o.a. door wrijving, verbranding, elektrische stroom, botsingen, de zon. Maar wat is warmte eigenlijk? Het is een transportvorm van energie. Hoe kunnen we weten hoe warm een voorwerp is en hoeveel energie in de vorm van warmte het bevat?

We horen het je al zeggen: je meet de warmte met een thermometer. Dat is toch evident, op de thermometer lees je de temperatuur af en klaar is kees.

Maar hoe meet je de temperatuur van een voorwerp?

Houden we de handen in water, dan kunnen we zeggen dat het water ofwel koud, lauw, of warm is. Maar doe de proef maar eens en je zult merken dat het zeer relatief is. Wat voor de ene koud is, zal voor de andere warm zijn.

Bovendien kunnen we :

- geen hoge en lage temperaturen meten met onze handen
- onderling temperaturen vergelijken gaat niet
- kleine temperatuurverschillen meten kan niet

Hoe kan men dan de temperatuur van een voorwerp meten?

Uit het materiemodel weet je nog dat voorwerpen uit moleculen bestaan. Die hebben een bepaalde snelheid. Als de moleculen een groter snelheid hebben dan is de temperatuur hoger. De temperatuur van een voorwerp is dus evenredig met de snelheid van de moleculen van het voorwerp en de snelheid van de moleculen is evenredig met de gemiddelde kinetische energie. Je weet nog wel: $E_k = m \cdot v^2 / 2$

In de praktijk is het echter onmogelijk de snelheid van moleculen te meten zodat we naar andere fysische methodes moeten uitkijken.

Voorbeelden

We stellen vast dat de elektriciteitsdraden uitzetten in de zomer. Een temperatuurverandering kan dus door een lengteverandering gemeten worden.

Twee temperaturen zijn verschillend als er een verschillende lengteverandering is. Is de lengteverandering dezelfde, dan zijn de twee temperaturen gelijk. Dan spreekt men van thermisch evenwicht.

1.2 Lengtetoeename van vaste stoffen

Proef

De proef met het toestel van Musschenbroek kan uitgevoerd worden met drie verschillende staven nl. aluminium, ijzer, en koper.

Besluiten

- 1) de lengtetoename $dl \sim l_0$ met l_0 de beginlengte bij 0°C
- 2) de lengtetoename $dl \sim dt$ met dt de temperatuurtoename gelijk aan $(t_2 - t_1)$
- 3) de lengtetoename dl is afhankelijk van de aard van de stof

Hieruit $dl \sim l_0 \cdot dt$ of $dl = \text{constante} \cdot l_0 \cdot dt$

met de constante $\lambda =$ de lineaire uitzettingscoëfficiënt van de stof in $1/^\circ\text{C}$ of $^\circ\text{C}^{-1}$
 met λ van de grootte - orde 10^{-6}

$$dl = \lambda \cdot l_0 \cdot dt$$

of $l_2 - l_1 = \lambda \cdot l_0 \cdot (t_2 - t_1)$ met $l_1 = l_0$ (ongeveer orde 10^{-6})

$$l_2 = l_1 \cdot (1 + \lambda \cdot dt)$$

Voorbeeld

Als $l_1 = 1$ m bij 0°C , hoeveel is dan de lengte van een ijzeren staaf bij 100°C ?

$$l_2 = 1 \cdot (1 + 12 \cdot 10^{-6} \cdot 100) = 1,0012 \text{ m}$$

De staaf is dus 1,2 mm langer geworden.

1.3 Volumetoename van vaste stoffen

Proef

Uit de proef van 's Gravesande zien we dat een vaste stof niet alleen in de lengte uitzet maar in drie verschillende richtingen.

Besluiten

- 1) de volumetoename $dV \sim V_0$ met V_0 het beginvolume bij 0°C
- 2) de volumetoename $dV \sim dt$ met dt de temperatuurtoename
- 3) de volumetoename dV hangt af van de aard van de stof

hieruit $dV \sim V_0 \cdot dt$ of $dV = \text{constante} \cdot V_0 \cdot dt$

met de constante $= \alpha =$ de kubieke uitzettingscoëfficiënt van de stof in $1/^\circ\text{C}$ of $^\circ\text{C}^{-1}$

In formule levert dat

$$dV = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$$

of $V_2 - V_1 = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$ met $V_1 = V_0$ vermits α zeer klein

$$V_2 = V_1 (1 + \alpha \cdot dt)$$

Verband tussen lengtetoeename en volumetoeename (λ en α)

We beschouwen een lichaam (kubus) met zijde l_1 en volume V_1 bij $t_1^\circ\text{C}$. Verwarmen we het lichaam tot $t_2^\circ\text{C}$ dan is het volume V_2 geworden volgens de formule $V_2 = V_1(1 + \alpha \cdot dt)$.

De zijde l_1 is $l_1(1 + \lambda \cdot dt)$ geworden zodat $V_1 = l_1^3$

$$\begin{aligned} \text{nu wordt } V_2 &= l_1^3 (1 + \lambda \cdot dt)^3 \\ &= l_1^3 (1 + 3 \cdot \lambda \cdot dt + 3 \cdot \lambda^2 \cdot dt^2 + \lambda^3 \cdot dt^3) \end{aligned}$$

de laatste twee termen zijn verwaarloosbaar omdat ze resp. van de orde 10^{-12} en 10^{-18} zijn.

Zodat

$$V_2 = V_1 (1 + 3\lambda \cdot dt)$$

Hieruit zien we dat

$$\alpha = 3\lambda$$

Er moeten dus geen afzonderlijke tabellen voor α gemaakt worden!

1.4 Verandering van massadichtheid

De massadichtheid $\rho_1 = m/V_1$ en $\rho_2 = m/V_2$ worden gegeven met de indexen 1 en 2 voor de resp. temperaturen t_1 en t_2 .

Vermits $V_2 = V_1(1 + \alpha \cdot dt)$ is dus

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 + \alpha \cdot dt)$$

en benaderend $\rho_2 = \rho_1 (1 - \alpha \cdot dt)$

Merk op dat ρ_2 kleiner is dan ρ_1

1.5 Oefeningen

1 De lengte van een metalen staaf is 13,600 m bij 0°C . Uit welk metaal is deze staaf vermoedelijk gemaakt als de lengte bij 40°C 13,606 m is?

2 Een koperen staaf ($\lambda = 17 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) meet 1000,0 m bij $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Hoeveel langer is de staaf bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$?

3 De lengte van een glazen staaf is 99,82 cm bij $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Een zinken staaf meet 99,68 cm bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Bij welke temperatuur hebben ze dezelfde lengte?

$$\lambda(\text{glas}) = 8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad \lambda(\text{Zn}) = 26 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

4 Een ijzeren vat heeft een volume van 6000,000 l. Hoeveel wordt het vat groter per graad temperatuurstijging.

$$\lambda(\text{Fe}) = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

5 De massadichtheid van goud is $19,36 \text{ g/cm}^3$ bij $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Hoeveel bedraagt ze bij $100 \text{ }^\circ\text{C}$ als $\alpha(\text{Au}) = 15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$?

1.6 Volumetoename van vloeistoffen

De uitzetting van een vloeistof, die steeds een volume uitzetting is, is gebonden aan een vat dat bij verwarmen eveneens uitzet.

Proef

In het labo doen we een proef over de uitzetting van een vloeistof nl. het bepalen van de uitzettingscoëfficiënt.

We vinden hier analoog:

1 $dV \sim dt$ de temperatuurtoename

2 $dV \sim V_0$ met V_0 het beginvolume bij $0 \text{ }^\circ\text{C}$

3 dV is afhankelijk van de aard van de vloeistof

Hieruit $dV \sim V_0 \cdot dt$ of $dV = c^{te} \cdot V_0 \cdot dt$

met constante $= \alpha =$ de kubieke uitzettingscoëfficiënt van de vloeistof in $^\circ\text{C}^{-1}$ en van de orde 10^{-6}

$$dV = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$$

met $V_0 = V_1$

$$V_2 = V_1(1 + \alpha \cdot dt)$$

Merk op dat in feite de werkelijke uitzetting gelijk is aan de schijnbare uitzetting plus de uitzetting van het vat.

zodat $\alpha_w = \alpha_s + \alpha_g$ met $\alpha_g \ll \alpha_s$

Bovendien is hier eveneens $\rho_2 = \rho_1 / (1 + \alpha \cdot dt)$

met $\rho_2 < \rho_1$ als $t_2 > t_1$

1.7 Herleiding van de barometerstand tot 0 °C

Daar de massadichtheid ook voorkomt in de formules voor hydrostatische en atmosferische druk (nl. $p = \rho \cdot g \cdot h$) zal men de druk altijd op 0°C moeten herleiden.

$$p_t = \rho_t \cdot g \cdot h$$

$$p_0 = \rho_0 \cdot g \cdot h \quad \text{en} \quad \rho_t = \rho_0 / (1 + \alpha \cdot dt)$$

of $p_0 = \rho_t (1 + \alpha \cdot dt) \cdot g \cdot h = p_t (1 + \alpha \cdot dt)$

$p_0 = p_t(1 + \alpha \cdot dt)$

Voorbeeld

De druk is 1013.0 hPa bij 24 °C.

Herleid deze druk tot 0°C als $\alpha(\text{Hg}) = 180 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$

$$p_0 = 1013.0 (1 + 180 \cdot 10^{-6} \cdot 24) = 1017.4 \text{ hPa}$$

De druk is dus groter bij lagere temperaturen

1.8 De onregelmatige uitzetting van water

De proef van Hope toont aan dat water van 4 °C 'zwaarder' is dan warmer water. We zien dat eerst de onderste thermometer daalt en dan pas de bovenste.

We besluiten hieruit dat water van 4 °C de grootste dichtheid heeft.

Als de temperatuur t stijgt van 0 °C tot 4 °C zal V dalen en ρ stijgen, de stof krimpt!!

Als de temperatuur t stijgt van 4 °C tot 100 °C zal V stijgen en ρ dalen, de stof zet uit!!

Een toepassing hiervan is het overwinteren van vissen.

1.9 Oefeningen

1 Is het in een vijver altijd even koud of even warm in de zomer en in de winter?

2 Waarom zetten treinsporen wel en tramsporen niet uit?

3 Een glazen buis met een oppervlakte van 10 mm² bevat 2,5 cm³ ether bij 0 °C. Hoe hoog stijgt de ether in de buis als $t = 50 \text{ °C}$ en $\alpha(\text{ether}) = 1660 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$?

4 We lezen de barometerstand af van 76,3 cm bij een temperatuur van 20 °C. Herleid deze barometerstand tot 0 °C als je weet dat voor kwik $\rho(0) = 13,60 \text{ g/cm}^3$ en $\rho(20) = 13,55 \text{ g/cm}^3$.

5 Een glazen vat van 250,00 cm³ wordt bij 15 °C volledig met alcohol gevuld. Hoeveel alcohol loopt over als de temperatuur in de kamer tot 24 °C stijgt?
 $\alpha(\text{alcohol}) = 112 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\alpha(\text{glas}) = 8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

1.10 Volumetoename van gassen

Proef

Uit het proefje voor de uitzetting van gassen zien we dat met een open buis, het water inderdaad stijgt door uitzetting van de lucht (= gas). De druk blijft hier constant, want de buis is open aan één zijde.

Volgende besluiten kunnen geformuleerd worden bij constante druk.

- 1) $dV \sim dt$ de volumetoename is evenredig met de temperatuurtoename
- 2) $dV \sim V_0$ de volumetoename is evenredig met het beginvolume bij 0 °C

Hieruit $dV \sim V_0 \cdot dt$ of $dV = \text{constante} \cdot V_0 \cdot dt$

die constante = α = de uitzettingscoëfficiënt van het gas

$$dV = \alpha \cdot V_0 \cdot dt$$

Onderzoek van α voor verschillende gassen door leverde het volgende:

- 1) de uitzettingscoëfficiënt α is onafhankelijk van de constante druk p
- 2) α is nagenoeg onafhankelijk van de begintemperatuur en van het beschouwde temperatuurinterval
- 3) voor alle gassen vond men dezelfde waarde voor α nl.

$$\alpha = 1/273,15 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 0,0037 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Merk op dat we hier geen benaderingsformule $V_1 = V_0$ mogen gebruiken want α is hier van de orde $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Wel geldt:

$$V_1 = V_0(1 + \alpha \cdot t)$$

Plaatsen we deze formule in een $V(t)$ -diagram dan bekomen we rechten die we isobaren noemen.

2 WARMTECAPACITEIT VASTE STOFFEN EN VLOEISTOFFEN

2.1 Merkbare en latente warmte

PROEF

- We verwarmen een vaste stof met de bunsenbrander, zoals bijvoorbeeld bij de proef van s' Gravesande. De temperatuur van de bol stijgt.
- Een beker met water wordt op een draadnet gezet en we verwarmen. De temperatuur van het water stijgt.
- Een glazen kolf met lucht wordt verwarmd. De thermometer duidt een hogere temperatuur aan.

Verklaring

Moleculen bewegen voortdurend. Voegen we thermische energie toe dan bewegen ze meer. De inwendige kinetische energie is gestegen.

Besluit

Vaste stoffen, vloeistoffen en gassen die verwarmd worden, waar we dus thermische energie aan toevoegen stijgen in temperatuur. Die toegevoerde warmte noemen we merkbare warmte.

PROEF

- Als je een beker met smeltend ijs verwarmt, dan blijft de temperatuur op 0 °C tot alle ijs gesmolten is, hoeveel warmte je ook toevoert.
- Een beker met kokend water blijft op 100 °C hoeveel warmte je ook toevoert.

Verklaring

De moleculen gebruiken de toegevoerde energie om te veranderen van aggregatietoestand. De inwendige potentiële energie is gestegen.

Besluit

Bij het toevoegen van thermische energie terwijl de temperatuur constant blijft spreken we over latente warmte.

Schematisch

- Warmte die toegevoerd wordt is ofwel merkbare warmte - de temperatuur stijgt, ofwel latente warmte - de temperatuur blijft gelijk.
- Bij merkbare warmte verhoogt de inwendige kinetische energie van de moleculen, bij latente warmte verhoogt de inwendige potentiële energie van de moleculen.

2.2 Warmtehoeveelheid

We hebben al in het deel over energie vastgesteld dat thermische energie een vorm is van energie. De eenheid van energie is de Joule. Het is duidelijk dat ook thermische energie en dus ook warmte, die de transportvorm van energie is, in Joule zal uitgedrukt worden.

De hoeveelheid warmte die we toevoeren noemen we de warmtehoeveelheid en als symbool gebruiken we Q die we in J uitdrukken.

Het spreekt vanzelf dat men het begrip warmtehoeveelheid nauwkeurig gedefinieerd heeft:

4186 J is de warmtehoeveelheid nodig om 1 kg water van 14,5 °C tot 15,5 °C te verwarmen.

PROEF

Met de calorimeter kunnen we vaststellen dat

- 1) $dt \sim Q$: de temperatuur stijgt als we warmte toevoeren
- 2) $dt \sim 1/m$: hoe groter de massa water hoe lager de temperatuur stijgt bij gelijke warmtehoeveelheden
- 3) dt is afhankelijk van de aard van de stof

hieruit zien we dat $dt \sim Q/m$

of $Q = \text{constante} \cdot m \cdot dt$

de constante stellen we voor door het symbool c en we noemen ze de warmtecapaciteit van de stof, ze is afhankelijk van de aard van de stof. De formule voor de warmtehoeveelheid wordt:

$$Q = m \cdot c \cdot dt$$

waarbij volgende grootheden en eenheden gebruikt worden
 Q in J; m in kg; c in J/kg°C; dt in °C

Uit de definitie van warmtehoeveelheid wordt de warmtecapaciteit van water $c_w = 4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C} = 4,186 \text{ J/g}^\circ\text{C}$

Waterwaarde

Een vloeistof moet steeds in een vat gegoten worden. Dat vat neemt echter bij het verwarmen zelf warmte op.

Hoeveel warmte neemt het vat van een calorimeter dan op?

Om dit duidelijk te maken vertrekken we van een voorbeeld.

Een ijzeren calorimeter met een massa van 100 g en waarvan we weten dat de warmtecapaciteit van ijzer $c(\text{Fe}) = 418,6 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ is, neemt bij 1°C temperatuurstijging een warmtehoeveelheid $Q = 0,100 \times 418,6 \times 1 = 41,86 \text{ J}$ warmte op. Er zijn echter ook $41,86 \text{ J}$ nodig om 10 g water 1°C in temperatuur te laten stijgen, want voor water is $Q = 0,010 \times 4186 \times 1 = 41,86 \text{ J}$.

Dit betekent dat het ijzeren vat van 100 g gelijkwaardig is met 10 g water. Deze 10 g water noemen we de waterwaarde van de calorimeter. We stellen ze voor door het symbool u en de eenheden zijn kg. (of g)

De waterwaarde u is de massa water die dezelfde warmtehoeveelheid opneemt (afgeeft) als het vat om evenveel in temperatuur te stijgen. (te dalen)

Kent men de waterwaarde u , dan moet men dit getal met dt en c_w vermenigvuldigen om de warmtehoeveelheid van het calorimetervat Q te kennen. Het is dus niet noodzakelijk te weten uit welk materiaal de calorimeter gemaakt is.

De formule voor de warmtehoeveelheid opgenomen of afgegeven door het calorimetervat is dan:

$$Q = u \cdot c_w \cdot dt$$

Voorbeeld

Hoe groot is de warmtehoeveelheid van een calorimetervat bij een temperatuurstijging van 100°C als de waterwaarde 30 g is?

$$Q = 0,030 \times 4186 \times 100 = 12558 \text{ J}$$

Schematisch

- De warmtehoeveelheid Q wordt gegeven door de formule: $Q = m \cdot c \cdot dt$
- Het calorimetervat zelf neemt ook warmte op, de waterwaarde is een begrip dat aanduidt met hoeveel gram water het calorimetervat overeenkomt.

2.3 Wet van behoud van energie

Mengen van twee vloeistoffen, een warme en een koude zorgt voor een evenwichtstemperatuur t_e . Het warme water zal warmte afstaan aan het koude water. Het koude water zal warmte opnemen van het warme water.

In het ideale geval waarbij er geen warmteverliezen zijn via de omgeving zal:

de afgestane warmte (A.W.) = de opgenomen warmte (O.W.)

Deze wet is niets anders dan de wet van behoud van energie.

Merk op dat:

Er zijn geen negatieve temperaturen.

Proeven met de calorimeter vlug moeten gebeuren om de warmteverliezen te beperken.

Schematisch

Alle afgestane warmte is gelijk aan de opgenomen warmte.
Dit is de wet van behoud van energie.

2.4 Bepalen van de waterwaarde van een calorimeter

LABPROEF

In een calorimeter met onbekende waterwaarde u bevindt zich een massa m koud water op temperatuur t . Voegen we daar een massa m' warm water op temperatuur t' aan toe, dan krijgt men na menging een evenwichtstemperatuur t_e . De calorimeter en het koud water zullen warmte opnemen, het warm water zal warmte afstaan.

$$\begin{aligned} \text{O.W. door calorimeter } Q_1 &= u \times c_w \times (t_e - t) \\ \text{O.W. door koud water } Q_2 &= m \times c_w \times (t_e - t) \\ \text{A.W. door warm water } Q' &= m' \times c_w \times (t' - t_e) \end{aligned}$$

en vermits $\text{O.W.} = \text{A.W.}$

$$\text{is } Q_1 + Q_2 = Q'$$

$$\text{of } (m + u) \times c_w \times (t_e - t) = m' \times c_w \times (t' - t_e)$$

Hieruit volgt u na berekening

$$u = \frac{m' \cdot c_w \cdot (t' - t_e) - m \cdot c_w \cdot (t_e - t)}{c_w \cdot (t_e - t)}$$

2.5 Bepalen warmtecapaciteit van een vaste stof of vloeistof

LABPROEF

Kennen we de waterwaarde u van de calorimeter dan kunnen we c , de warmtecapaciteit van een onbekende vaste stof of vloeistof berekenen.

In een calorimeter met waterwaarde u bevindt zich een massa m water op temperatuur t . We voegen daar een massa m' van de onbekende stof aan toe op temperatuur t' . Na mengen krijgen we de evenwichtstemperatuur t_e .

De calorimeter en het water zullen warmte opnemen, de onbekende stof zal warmte afstaan.

$$\begin{aligned} \text{O.W. door de calorimeter } Q_1 &= u \times c_w \times (t_e - t) \\ \text{O.W. door water } Q_2 &= m \times c_w \times (t_e - t) \\ \text{A.W. door vaste stof } Q' &= m' \times c \times (t' - t_e) \end{aligned}$$

vermits O.W. = A.W. is $Q_1 + Q_2 = Q'$ of

$$(m + u) \times c_w \times (t_e - t) = m' \times c \times (t' - t_e)$$

waaruit volgt dat:

$$c = \frac{(m + u) \cdot c_w \cdot (t_e - t)}{m' \cdot (t' - t_e)} \quad \text{met } c \text{ in J/kg}^\circ\text{C}$$

Merk op dat de warmtecapaciteit c verandert met de aggregatietoestand. Zo is de warmtecapaciteit van ijs verschillend van de warmtecapaciteit van water. Bekijk de tabellen.

Opgave

Zoek de warmtecapaciteit c uitgaande van de volgende gegevens.

$u = 20 \text{ g}$; $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$; $t' = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; $m = 300 \text{ g}$; $m' = 25 \text{ g}$.

2.6 Vragen en opgaven

1 Hoeveel water kan men verwarmen van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ tot $50 \text{ }^\circ\text{C}$ als we 1990 J warmte toevoeren?

2 We brengen 1 kg Cu van $100 \text{ }^\circ\text{C}$ in 3 l alcohol van $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Wat is de evenwichtstemperatuur als $c(\text{Cu}) = 377 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ en $c(\text{alcohol}) = 2428 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$? (merk op dat $\rho = m/V$)

3 In een calorimeter zit 400 g kwik op $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Voegen we daar 300 g lood op $100 \text{ }^\circ\text{C}$ aan toe dan wordt de evenwichtstemperatuur $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Hoeveel is de waterwaarde? $c(\text{Hg}) = 138 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; $c(\text{Pb}) = 125 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

4 In een calorimeter met waterwaarde 20 g zit 60 g lijnolie op $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Voegen we daar 76 g lood op $100 \text{ }^\circ\text{C}$ aan toe, dan wordt $t_e = 15,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Bereken $c(\text{lijnolie})$ als $c(\text{Pb}) = 125 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$?

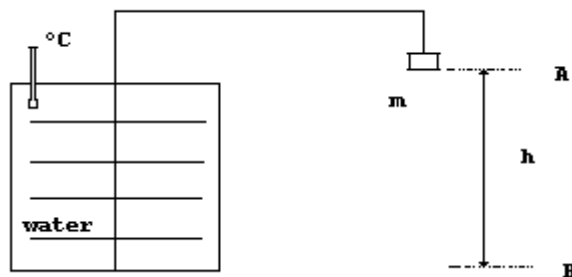
3 EQUIVALENTIE TUSSEN WARMTE EN ARBEID

3.1 Verband warmte en arbeid

Zowel warmte als arbeid worden uitgedrukt in Joule. Verrichten we arbeid dan moeten we die ook in warmte (dus in temperatuurstijging) kunnen omzetten. Als we arbeid verrichten dan zal E_k stijgen en ook de inwendige E_k , voeren we warmte toe dan zal eveneens E_k inwendig stijgen. Warmte en arbeid zijn equivalente begrippen.

3.2 Historische proef van Joule

In een calorimetervat met draaibare schoepen bevindt zich een massa m' water op temperatuur t' . De waterwaarde van het vat is u . Door middel van een stang en een katrol is dit vat verbonden met een massa m die van een punt A naar een punt B kan vallen. Bij het vallen draaien de schoepen zodat de temperatuur stijgt tot t .



- de geleverde arbeid is $W = E(A) - E(B)$
 met $E(A) = E_p \text{ in } A + E_k \text{ in } A = m \cdot g \cdot h + 0$
 met $E(B) = E_p \text{ in } B + E_k \text{ in } B = 0 + m \cdot v^2 / 2$
 of $W = m \cdot g \cdot h - m v^2 / 2$

- de toegevoerde warmte is $Q = (m' + u) \cdot c_w \cdot (t - t')$

met $W = Q$ kunnen we hieruit c_w berekenen (zie lab) of mits kennis van c_w vaststellen dat $W = Q$ (geen energieverlies)

LABPROEF

Een kleine koperen calorimeter wordt gevuld met water. Via een massa van 5 kg wordt door een draaiende beweging een touw over de calorimeter gelegd die de temperatuur doet stijgen.

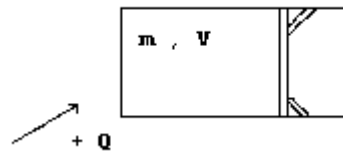
Schematisch

Warmte en arbeid zijn equivalente begrippen, dit betekent dat we warmte in arbeid kunnen omzetten en omgekeerd.

4 WARMTECAPACITEIT VAN GASSEN

Om de warmtecapaciteit van een gas te berekenen moeten we met twee soorten warmtecapaciteiten rekening houden nl. deze bij constant volume en deze bij constante druk. Uit de studie van de gaswetten weten we immers dat zowel het volume als de druk evenredig zijn met de absolute temperatuur.

4.1 Warmtecapaciteit bij constant volume

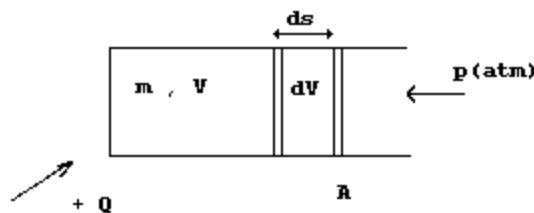


We veronderstellen een massa m gas op temperatuur T in een cilinder. De zuiger wordt vastgezet, daardoor blijft het volume constant. De toename van de warmte-energie bij het verwarmen wordt gebruikt om de potentiële energie van de gasmoleculen te verhogen.

We noemen c_v de warmtecapaciteit bij constant volume en Q_v de toegevoerde warmte bij constant volume.

$$dE_{th} = Q_v = m \cdot c_v \cdot dt \quad (1)$$

4.2 Warmtecapaciteit bij constante druk



De massa m van een gas kan door verwarmen niet alleen zijn warmte-energie vergroten, maar zal door het verplaatsen van de zuiger ook arbeid moeten verrichten. De druk blijft constant, te weten de atmosferische druk. Hieruit volgt dat:

$$dE_{th} = Q_p - W$$

hierin is $Q_p = m \cdot c_p \cdot dt$ met c_p de warmtecapaciteit bij constante druk en Q_p de warmtehoeveelheid bij constante druk.

De arbeid kan als volgt berekend worden.

$$\text{Vermits } W = F \cdot dx \text{ met } F = p \cdot A$$

en dat $dx = dV/A$ zal $W = F.ds = p.A.dV / A = p.dV$

De uitdrukking $p.dV$ noemen we de uitwendige arbeid, deze arbeid dient om de zuiger te verplaatsen.

$$dE_{th} = Q_p - p.dV \quad (2)$$

Het gas heeft energie gewonnen door opname van Q_p , maar ook een deel verloren door het verrichten van uitwendige arbeid W . Uit (1) en (2) kunnen we afleiden dat $Q_v = Q_p - p.dV$

$$Q_p - Q_v = W \quad (3)$$

Uit (3) halen we het verband tussen c_p en c_v

$$m.c_p.dt - m.c_v.dt = p.dV$$

$$c_p - c_v = p.dV / m.dt$$

Bij constante druk is $dV = \alpha.V_0.dt$ met $\alpha = 1/273 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 1/T_0$ want dit volgt uit de gaswetten.

of $c_p - c_v = p.V_0 / m.T_0$ stel hierin $m = 1 \text{ mol}$ dan is

$$p.V_0 / T_0 = 8,32 \text{ J/molK}$$

$$\text{of } c_p - c_v = 8,32 \text{ J/molK}$$

stel $m = M \text{ g}$ dan is $c_p - c_v = 8,32/M \text{ J/gK}$

$$M.(c_p - c_v) = 8,32 \text{ J/gK} \quad \text{formule van Mayer}$$

Voorbeelden

- voor lucht is $c_p = 1005 \text{ J/kgK} = 1,005 \text{ J/gK}$
 $c_v = 712 \text{ J/kgK} = 0,712 \text{ J/gK}$
- de molecuulmassa voor lucht is $M = 29 \text{ g}$

$$\text{of } 29(1,005 - 0,712) = 29 \cdot 0,293 = 8,50 \text{ J/gK}$$

Dit stemt bijna overeen met de theoretische waarde van R . Uit kennis van c_p kunnen we dus c_v berekenen en omgekeerd

Schematisch

Bij gassen hebben we twee warmtecapaciteiten, nl. deze bij constant volume en deze bij constante druk.

De betrekking $M (c_p - c_v) = 8,32 \text{ J/molK}$ levert het verband.

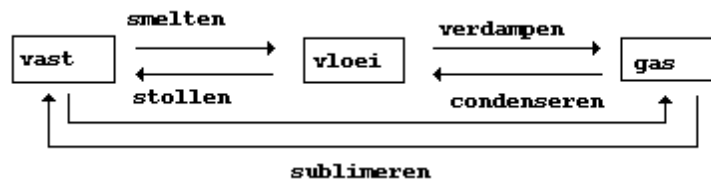
4.4 Vragen en opgaven

1 Bereken de warmtehoeveelheid van lucht bij constante druk in een lokaal van 210 m^3 bij atmosferische druk als de temperatuur van $12 \text{ }^\circ\text{C}$ tot $32 \text{ }^\circ\text{C}$ stijgt. (c_p lucht = $1009 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$)

2 Een ijzeren blok van 6 kg op $600 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt in een ruimte, gevuld met lucht, van 80 m^3 , op temperatuur van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ gebracht. Als de druk constant blijft, hoeveel wordt dan de evenwichtstemperatuur? $c(\text{Fe}) = 460 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; $c_p = 1009 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

FASEOVERGANGEN

Verwarmen we een stof zonder dat de temperatuur stijgt, dan treedt er verandering van aggregatietoestand op, de toegevoerde warmte noemt men latente warmte. Onderstaand schema maakt de verschillende mogelijkheden duidelijk.

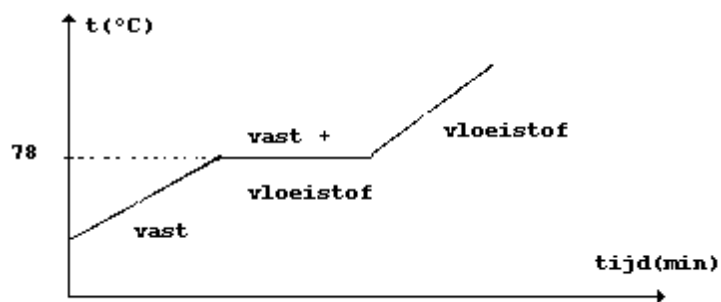


5 SMELTEN EN STOLLEN

5.1 Wat is smelten, wat is stollen?

Als de temperatuur voldoende stijgt en mits er geen chemische ontbinding is, zullen de meeste vaste stoffen smelten, omgekeerd zal ook elke vloeistof stollen als de temperatuur voldoende daalt. Dit komt omdat de moleculen trillen om een evenwichtsstand, door warmtetoevoer stijgt hun inwendige potentiële energie en de stof smelt.

Verwarmen we een vaste stof bv. naftaline dan kunnen we in een temperatuur(tijd)-diagram het volgende vaststellen



Een zuivere stof geeft bij atmosferische druk (1013 hPa) steeds een rechte lijn; mengsels, oplossingen en legeringen geven geen rechte lijn, maar een lichtjes stijgende lijn.

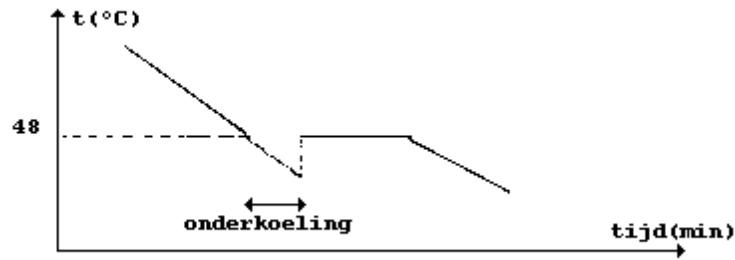
De temperatuur waarbij het stollen of smelten plaatsgrijpt bij atmosferische druk noemt men het smeltpunt of stolpunt: t_s

Het is de enige temperatuur waarbij de vaste en de vloeibare fase terzelfder tijd in voorkomen.

Opm. Sommige stoffen zoals hars, pek en boter vertonen een onechte smelting (continu lijn). Een echte smelting daarentegen is steeds discontinu.

5.2 Onderkoeling - metastabiel

Het kan gebeuren dat een stof bij afkoeling vloeibaar blijft bij temperaturen beneden het stolpunt. Dit is het geval bij $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ met smeltpunt 48°C . Dergelijke toestand noemt men onderkoeling, het is een metastabiele toestand die terug normaal wordt door schudden of door contact met een kristal van de stof.



5.3 Smeltings- of stollingswarmte

Bij het smelten neemt een stof warmte op, hoewel de temperatuur ongewijzigd blijft, deze warmtehoeveelheid wordt bij het stollen weer afgestaan.

PROEF

Uit proeven blijkt dat:

- 1) $Q \sim m$
- 2) Q afhankelijk is van de aard van de stof

of $Q = \text{constante} \cdot m$

met de constante = L_s = smeltings- of stollingswarmte afhankelijk van de aard van de stof

$$Q = m \cdot L_s$$

met L_s in J/kg

5.4 Bepalen van de smeltingswarmte van ijs

LABPROEF

In een calorimeter met waterwaarde u bevindt zich een massa m water op temperatuur t . Voegen we daar een blok ijs met massa m' op t' °C aan toe, dan moet deze blok ijs eerst smelten en dan pas zal de evenwichtstemperatuur te bereikt worden.

A.W. door calorimeter $Q_1 = u \cdot c_w \cdot (t - t_e)$

A.W. door water in calorimeter $Q_2 = m \cdot c_w \cdot (t - t_e)$

O.W. door het ijs $Q_1' = m' \cdot L_s$

O.W. door water van ijs $Q_2' = m' \cdot c_w \cdot (t_e - t')$

Uit de wet van behoud van energie is A.W. = O.W.

of $Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2'$

Hieruit volgt na berekening

$$L_S = (Q_1 + Q_2 - Q_2') / m' \text{ of}$$

$$L_S = \frac{(m + u) \cdot c_w \cdot (t - t_e) - m' \cdot c_w \cdot (t_e - t')}{m'}$$

met L_S J/kg

Voorbeeld

voor ijs is $L_S = 334880 \text{ J/kg} = 335 \text{ J/g}$

5.5 Uitgewerkt voorbeeld

In een calorimeter met waterwaarde 300 g bevinden zich 300 g olie, met $c(\text{olie}) = 2428 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ van 10°C . We brengen nu 540,5 g lood van 400°C in de calorimeter (smeltpunt = 330°C). Hierdoor wordt een evenwichtstemperatuur van 30°C verkregen. Hoe groot is de smeltingswarmte van lood? $c(\text{Pb vast}) = 128 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; $c(\text{Pb vloeibaar}) = 172 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

A.W. door

lood vloeibaar $Q_1 = 0,5405 \cdot 172 \cdot (400-330) = 6508 \text{ J}$

lood tijdens stollen $Q_2 = 0,5405 \cdot L_S$

lood vast $Q_3 = 0,5405 \cdot 128 \cdot (330-30) = 20755 \text{ J}$

O.W. door

calorimeter $Q_1' = 0,300 \cdot 4186 \cdot (30-10) = 25116 \text{ J}$

olie $Q_2' = 0,300 \cdot 2428 \cdot (30-10) = 14568 \text{ J}$

O.W. = A.W.

of $6508 + 0,5405 \cdot L_S + 20755 = 25116 + 14568$

$0,5405 \cdot L_S = 12421 \text{ J}$ of $L_S = 22981 \text{ J/kg}$

Schematisch

- Bij het smeltpunt van een vaste stof komt de vaste en vloeibare stof terzelfder tijd voor.
- Onderkoeling heeft plaats als een vaste stof vloeibaar blijft beneden het smeltpunt.
- Bij het smelten neemt een stof warmte op die bij het stollen weer wordt afgestaan. De formule wordt gegeven door: $Q = m \cdot L_V$

5.6 Vragen en opgaven

1 Hoeveel warmte moet 100 g paraffine afstaan om van 60 °C tot 10 °C af te koelen?
 $t_s = 52 \text{ °C}$; $L_S = 146510 \text{ J/kg}$; $c(\text{paraffine}) = 2470 \text{ J/kg°C}$

2 Hoeveel warmte moet men toevoeren om 5 g ijs van -10 °C tot +20 °C te brengen?
 $c(\text{ijs}) = 3349 \text{ J/kg°C}$

3 In een calorimeter met waterwaarde 80 g bevindt zich 2,22 kg kwik op een temperatuur van 11,5 °C. Voegen we daar een blok vloeibaar lood van 35 g op 340 °C aan toe, hoeveel is dan L_S als $t_e = 15 \text{ °C}$? $c(\text{Hg}) = 138 \text{ J/kg°C}$; $c(\text{Pb vast}) = 128 \text{ J/kg°C}$; $c(\text{Pb vl}) = 172 \text{ J/kg°C}$; $t_s (\text{Pb}) = 327 \text{ °C}$

4 In een calorimeter met waterwaarde 80 g bevindt zich 200 g water op $t = 12 \text{ °C}$. Voegen we daar 100 g vloeibare tin van 400 °C aan toe, hoeveel is dan de evenwichtstemperatuur? $t_s (\text{Sn}) = 232 \text{ °C}$; $L_S (\text{Sn}) = 58600 \text{ J/kg}$; $c(\text{Sn vast}) = 270 \text{ J/kg°C}$; $c(\text{Sn vl}) = 209 \text{ J/kg°C}$

5.7 Invloed van V op massadichtheid bij smelten en stollen

De formule voor massadichtheid $\rho = m/V$ is al bekend. Wat gebeurt er met het volume als de stof smelt?

Merken we op dat de toegevoerde warmte (er is hier geen temperatuurstijging) dient om de aggregatietoestand (vorm of volume) te veranderen.

PROEF

Een proefbuis bevat paraffine in vaste toestand. Bij verwarmen neemt het volume toe. We zien we dat er bij het smelten van een stof een volumevermeerdering optreedt.

Besluit

Als het volume stijgt zal de massadichtheid dalen, dit betekent dat: als V stijgt zal ρ dalen.

Uit de proef is duidelijk dat het volume van de vloeibare paraffine groter is dan het volume van de vaste paraffine of:

$$V(\text{vloeistof}) > V(\text{vast}) \text{ en dus } \rho(\text{vloeistof}) < \rho(\text{vast})$$

Op deze regel is er weer één uitzondering, nl. water. Smelten we een stuk ijs dan is er volumevermindering of:

$$V(\text{water}) < V(\text{ijs}) \text{ en dus } \rho(\text{water}) > \rho(\text{ijs})$$

Dit laatste leidt o.a. tot het barsten van waterleidingen en erosieverschijnselen.

Schematisch

- Het volume van een stof is groter in de vloeibare fase dan in de vaste fase
- Bij water is het volume in de vaste fase groter dan in de vloeibare fase, of ook het volume van ijs is groter dan dat van water.

5.8 Invloed van de druk op het smeltpunt

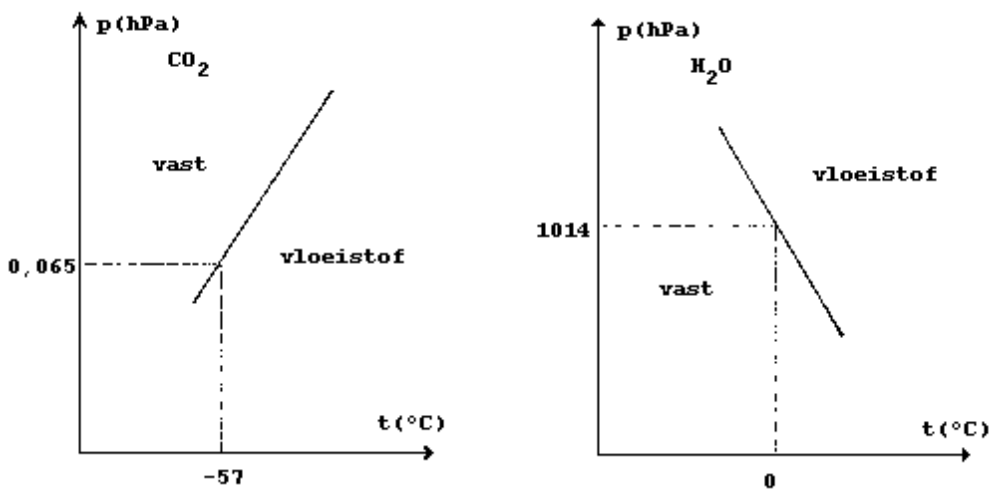
Welke invloed heeft de druk bij de overgang tussen smelten en stollen?

We hebben reeds gezien dat $p \cdot V = \text{constante}$, maar vermits het volume verandert bij de faseovergang zal ook de druk veranderen.

Bij alle normale stoffen zal als de druk p stijgt het volume V dalen, dit betekent dat de toestand met het kleinste volume (dit is de vaste toestand) zal overheersen. Om nu bij hogere druk weer vloeistof te krijgen moet de temperatuur t_s stijgen of als p stijgt zal t_s stijgen.

De uitzondering is weer water: als p stijgt dan zal V dalen, dus de toestand met het kleinste volume (dit is de vloeibare toestand) overheerst. Om nu bij een hogere druk weer vast te krijgen moet de temperatuur t_s dalen of als p stijgt zal t_s dalen. (alleen bij water!)

In een $p(t)$ -diagram behoort bij één druk één t_s , die lijn noemt men de smeltlijn.



Schematisch

De druk heeft invloed op de smelttemperatuur.

Als de druk stijgt zal ook het smeltpunt stijgen.

Er is één uitzondering, nl. voor water zal als de druk stijgt, het smeltpunt dalen. In een $p(t)$ -diagram kan men de smeltlijn tekenen.

6 VERDAMPEN EN CONDENSEREN

6.1 Verdampen in de atmosfeer

6.1.1 Kokend verdampen

Wanneer een vloeistof kookt, verdampt ze. Dat kunnen we mooi illustreren met een voorbeeld. De kom met water voor de spaghetti staat op het keukenfornuis. Even tussendoor naar het nieuws kijken en... de keuken zit onder de mist. Wat is er gebeurd? Door het verwarmen is de temperatuur van de vloeistof opgelopen tot ze uiteindelijk gaat koken. Kokend water verdampt: je ziet de vloeistof letterlijk veranderen in damp. Die waterdamp vult tenslotte heel de keuken.

Besluit

Een vloeistof verdampt terwijl ze kookt.

6.1.2 Vrij verdampen

PROEF

We gieten een paar druppels ether in een schaalpje.

Waarneming

Na een paar minuten is de ether verdwenen en hangt de geur ervan in het hele lokaal.

Besluit

Ether verdampt erg gemakkelijk.

Wanneer we wat water in een open schaalpje gieten, is er niets speciaals te zien boven het vloeistofoppervlak. En toch... een speciale foto toont je de ruimte boven het water, gemaakt met speciale belichting. Boven het oppervlak zie je nu wel de dampsluier.

Besluit

Bij kamertemperatuur verdampt een vloeistof voortdurend. Dit noemen we vrij verdampen.

Meestal gebeurt de vrije verdamping zo traag dat we de hoeveelheid vloeistof nauwelijks zien verminderen. Zo duurt het vele dagen eer een plas water op een plat dak (beton) volledig verdampt is. Ether daarentegen verdampt erg snel. Een slordig gesloten flesje ether kan na enkele uren al leeggedampt zijn.

Als je dan bovendien weet dat ether vermengd met lucht, erg ontplofbaar is besef je meteen dat je dergelijke slordigheden beter achterwege laat. Vloeistoffen die, net zoals ether, gemakkelijk verdampen, noemen we vluchtige stoffen.

Schematisch

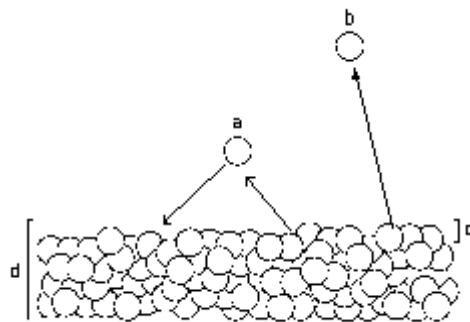
Een vloeistof kan kokend verdampen. Een vloeistof kan vrij verdampen.
Vluchtige stoffen zijn vloeistoffen die bij kamertemperatuur snel verdampen.

6.2 Vrij verdampen ontsluit

Dit is veruit de meest gekende vorm van verdamping. Zo ontstaan wolken door vrije verdamping van de oceanen. Ook het opdrogen van plassen, een gedweilde vloer, wasgoed, enz. is er het directe gevolg van.

Hoe gebeurt die vrije verdamping?

Elke vloeistof is opgebouwd uit moleculen. Die moleculen bewegen wanordelijk door elkaar, maar worden bijgehouden door onderlinge aantrekkingskrachten (= cohesie). Aan de oppervlakte kunnen alleen de snelste deeltjes aan die cohesie ontsnappen. Op die manier ontstaat damp. Meteen kan je begrijpen dat ether veel sneller verdampt dan water, omdat de cohesie tussen de ethermoleculen veel kleiner is dan die tussen de watermoleculen.



Nu we het mechanisme van de vrije verdamping ontsluit hebben, kunnen we tal van factoren bedenken die de verdamping bevorderen.

- Het is erg droog in de woonkamer. Om de lucht te bevochtigen, plaatsen we een schaalje met water boven op de radiator. Door het water te verwarmen krijgen immers meer deeltjes een voldoende grote snelheid om uit de vloeistof te ontsnappen.

Besluit

Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de verdamping.

- Wanneer je de was te drogen hangt, plooi je de lakens niet op, maar ga je ze breed uithangen. Dat is heel normaal want verdamping gebeurt aan de oppervlakte. Hoe groter die oppervlakte, des te meer deeltjes kunnen er ontsnappen. Daarom ook zal water veel sneller verdampen in een schaalje dan in een fles.

Besluit

Hoe groter het vrije vloeistofoppervlak, hoe sneller de verdamping.

- Op een winderige dag droogt de was aan de lijn veel sneller dan bij windstilte. Een plas water droogt dan ook vlugger op. Ontsnapte deeltjes botsen immers met luchtdeeltjes of met collega-vluchters. Daardoor kunnen ze terug in de vloeistof duiken. Door de lucht boven het vloeistofoppervlak voortdurend te verversen (= wind), vermindert de kans op botsen en terugkaatsen. Als alle deeltjes boven het vloeistofoppervlak worden weggepompt (luchtpomp) gebeurt de verdamping dus heel snel. Daarover zullen we het later nog hebben.

Besluit

Wind bevordert de verdamping.

- Vrij verdampen gebeurt in lucht en de lucht heeft een bepaalde druk, de atmosferische druk die verandert van dag tot dag. Hoe groter de luchtdruk, hoe minder kans dat de moleculen ontsnappen.

Besluit

Een hogere druk vermindert het vrij verdampen.

- In een tropische serre zal er veel minder verdamping zijn omdat de lucht al veel watermoleculen bevat die de ontsnappers terugdringen.

Besluit

Lucht met veel waterdamp vermindert het vrij verdampen.

Schematisch

Vrije verdamping gebeurt enkel aan de oppervlakte van een vloeistof.

Ze gebeurt bij elke temperatuur.

De vrije verdamping van een vloeistof wordt bevorderd door:

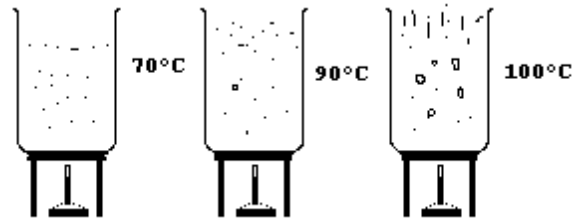
- een hogere temperatuur
- een groter vrij vloeistofoppervlak
- wind boven het vrije vloeistofoppervlak.
- vermindering van de luchtdruk boven de vloeistof

De verdampingssnelheid is bovendien afhankelijk van:

- de aard van de vloeistof
- de verzadigingstoestand van de lucht

6.3 Kokend verdampen nader bekeken

Het verschil tussen kokend verdampen en vrije verdamping kunnen we best aantonen door nauwkeurig het kookproces van water te volgen. De volgende tekeningen illustreren het perfect.



Wat gebeurt er allemaal?

Zodra we het water opwarmen, zie je gasbelletjes verschijnen in de vloeistof. Dat is geen waterdamp, maar lucht die in het water opgelost is.

Bij hogere temperatuur lijkt het water wel te roken: aan de oppervlakte verdampt het water en in de koelere lucht erboven condenseert het opnieuw tot fijne mist. Dat is dus vrije verdamping! Bij nog verdere verwarming maakt het water een vreemd geluid. We spreken van 'razen'. De Fransen hebben daarvoor een vriendelijkere uitdrukking: 'l'eau chante'. Je ziet dan duidelijk dampbellen ontstaan binnen de vloeistof. Die dampbellen stijgen op maar geraken nog niet tot aan het oppervlak. Onder invloed van de atmosferische druk worden de dampbellen weer samengedrukt. De druk binnen de bellen is dus nog te klein.

Pas bij 100 °C is de druk binnen zo'n bel groot genoeg om het tot boven uit te houden. Aan het oppervlak barsten de dampbellen open en ontsnapt er waterdamp. We zeggen dat het water kookt. Bij het koken bereikt de druk binnen de dampbellen zijn hoogste waarde. We noemen die druk de maximum dampdruk van water bij 100 °C.

Slimmeriken onder jullie hebben al lang begrepen dat de maximum dampdruk van water bij 100 °C nagenoeg gelijk is aan de atmosferische druk. Geloof je het niet? Hier het bewijs!

PROEF

Een J-vormig buisje (aan de korte kant gesloten) is gedeeltelijk gevuld met kwik. In het korte been bevindt er zich, boven het kwik, een kleine hoeveelheid uitgekookt water (= water zonder opgeloste lucht).

Door de atmosferische druk (aan de kant van het lange been) is het korte been volledig gevuld. Dit toestelletje dompelen we onder in een beker met gedemineraliseerd water. We verwarmen het water in de beker tot aan de kooktemperatuur.

Waarneming

Het kwik komt in de beide benen op een gelijk niveau.

Verklaring

Bij het verwarmen zal het water in het korte buisje verdampen. Door de dampdruk wordt het kwik een beetje naar beneden geduwd. Bij 100 °C heeft de dampdruk zijn maximale druk bereikt. Op dat moment is het kwikniveau in de beide benen gelijk. De druk is dus dezelfde aan de beide zijden.

Besluit

Bij het kookpunt wordt de maximum dampdruk van water gelijk aan de atmosferische druk.

Kan de temperatuur van het water stijgen tot boven de kooktemperatuur? Probeer maar: flink blijven verwarmen en... de temperatuur blijft gelijk aan 100 °C! Nogmaals een bewijs dat de dampdruk bij 100 °C de maximum dampdruk is. Meteen hebben we aangetoond dat het kookpunt van water 100 °C is.

Schematisch

Een vloeistof kookt bij een bepaalde temperatuur. We noemen dit het kookpunt. Zolang een vloeistof kookt blijft de temperatuur constant. Als een vloeistof kookt, ontstaan er dampbellen binnen de vloeistofmassa. De druk binnen een dampbel is gelijk aan de atmosferische druk.

6.4 Invloed van de druk op het kookpunt

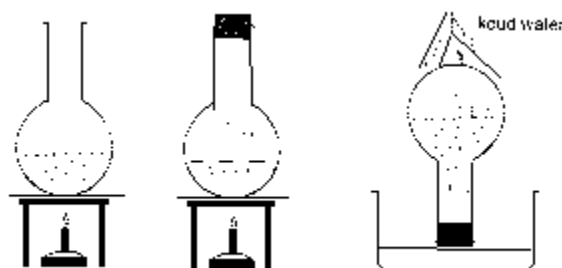
6.4.1 In theorie

Het lijkt zo vanzelfsprekend: water kookt bij 100 °C. We willen je nu bewijzen dat het ook anders kan.

PROEF: proef van Franklin

In een kolf met nauwe Hals laten we zuiver water flink koken. Dat gebeurt natuurlijk bij 100 °C: controleer maar met de thermometer.

Op het moment dat er veel damp gevormd is, nemen we de kolf van het vuur en sluiten hem onmiddellijk af met een rubberstop. Het water kookt niet meer! We keren nu de kolf om en gieten er koud water over.



Waarneming

Het water in de kolf begint opnieuw te koken, hoewel zijn temperatuur lager is dan 100 °C.

Verklaring

Door de afkoeling condenseert een deel van de damp in de kolf tot water. Water neemt minder plaats in en dus daalt de druk in de kolf. Waterdeeltjes die nu willen ontsnappen uit de vloeistof ondervinden minder weerstand. Er ontstaan daardoor

opnieuw dampbellen die opstijgen en het oppervlak bereiken. Het water kookt opnieuw.

Je kan het ook anders zeggen. Omdat de druk boven het water nu verlaagd is, hoeft de druk binnen de dampbellen ook niet meer zo groot te zijn om het water te laten koken. De maximum dampdruk van water is bij deze temperatuur dus lager dan bij 100 °C.

6.4.2 In praktijk: de drukkookpan

Bij drukverlaging daalt het kookpunt, dit zagen we net zonet bij de proef van Franklin. Is het omgekeerde ook waar? Zal het kookpunt bij drukverhoging stijgen? Dat laatste gebeurt inderdaad in een drukkookpan.

Bij hoge temperatuur is zo'n pan gevuld met waterdamp. Daardoor worden waterdeeltjes die willen ontsnappen uit de vloeistof, steeds meer tegengewerkt. Om dampbellen te vormen moet de temperatuur dus steeds hoger worden. Het kookpunt stijgt. Maar daardoor wordt de dampdruk opnieuw groter zodat het water dus niet meer kan koken! In plaats daarvan blijven temperatuur en dampdruk stijgen zolang er verwarmd wordt.

In een gewone drukkookpan zal de temperatuur stijgen tot 120 °C, de druk tot tweemaal de atmosferische druk. Zo'n drukpan is immers voorzien van een veiligheidsventiel; bij een hogere druk kan de waterdamp ontsnappen.

Met een drukkookpan is er minder energie nodig voor voedselbereiding. Hiervoor zijn er twee redenen:

- bij de hogere temperatuur is het voedsel vlugger gaar.
- er wordt minder water omgezet in waterdamp, wat ook energie vergt.

6.4.3 In praktijk: iets voor bergbeklimmers

Op grote hoogte is de luchtdruk laag. Daar is het kookpunt van water dus ook lager dan 100 °C. In de bergen duurt het dan ook veel langer om voedsel gaar te koken. Thee bijvoorbeeld, gezet op de top van de Mont Blanc (4810 m), blijft waterachtig. Het kookpunt van water is er slechts 84,5 °C, zodat de extractie van kleur-, geur- en smaakstoffen onvolledig gebeurt.

Grote bergexpedities nemen drukkookpannen mee: door de drukverhoging kan op die manier toch een temperatuur van 100 °C bereikt worden, zodat niet al te veel tijd verspild wordt aan het koken.

Ter illustratie geven we jullie nog een tabel waarin naast de hoogte ook de luchtdruk vermeld staat. In de derde kolom zie je met eigen ogen hoe snel de kooktemperatuur van water terugloopt.

hoogte (m) luchtdruk (hPa) kookpunt (°C)

hoogte (m)	luchtdruk (hPa)	kookpunt (°C)
0	1013	100
680	933	97,7

2610	733	91,2
4810	565	84,5
8950	333	71,6

Schematisch

Als de druk boven een vloeistof daalt, dan daalt het kookpunt van die vloeistof.
Als de druk boven een vloeistof stijgt, dan stijgt het kookpunt van die vloeistof.

6.5 Normaal kookpunt van een vloeistof

Het kookpunt van een vloeistof hangt af van de luchtdruk boven die vloeistof. Zo kan je water zelfs laten koken bij een temperatuur van 0 °C, wanneer je de luchtdruk laat dalen tot 6 hPa. Wanneer we het kookpunt van een vloeistof vermelden, moeten we dus ook altijd opgeven bij welke luchtdruk de temperatuur opgemeten is. Het kookpunt van een vloeistof bij een luchtdruk van 1013 hPa noemen we het normaal kookpunt van die vloeistof. Het normaal kookpunt van water is 100 °C.

Schematisch

Het kookpunt van een vloeistof bij een luchtdruk van 1013 hPa noemen we het normaal kookpunt van die vloeistof.

6.6 Verdamping vereist warmte

PROEF

We vullen een schroefdop met ether. We brengen een paar druppels water op een lucifersdoosje en plaatsen het schroefdopje er bovenop. Daarna blazen we met een fietspomp lucht over de ether, zodat de verdamping snel verloopt.

Waarneming

Na een paar minuten kleeft de dop aan het doosje: het water is bevroren. Tijdens het verdampen is de ether dus sterk afgekoeld.



Verklaring

Bij de verdamping ontsnappen de snelste deeltjes (= met de meeste energie) aan het vloeistofoppervlak. De ether krijgt dus een lagere temperatuur. Wanneer de ether snel verdampt (fietspomp!) krijgen de etherdeeltjes in de vloeistof geen tijd om energie uit de omgeving te halen zodat de temperatuur steeds verder daalt. Kokend water verdampt ook maar koelt toch niet af: je blijft immers warmte toevoeren om het water aan de kook te houden.

Schematisch

Om een vloeistof te laten verdampen is er warmte nodig.
Die warmte haalt de vloeistof:

- ofwel uit zichzelf (de vloeistof koelt dan af)
- ofwel uit de omgeving (de temperatuur blijft dan gelijk).

6.7 Voor wie graag wat rekent

Tijdens het verdampen neemt een vloeistof warmte op uit de omgeving. Daardoor blijft de temperatuur constant. Wanneer de damp opnieuw condenseert, wordt deze warmte opnieuw afgestaan.

Waarvan is deze opgenomen warmte afhankelijk?

PROEF

We plaatsen twee kolven, de ene gevuld met 50 g water, de andere met 100 g water op twee identieke bunsenbranders. We verwarmen de beide kolven gelijktijdig en noteren de temperatuur van de beide kolven om de minuut. We verwarmen tot een temperatuur van 50 °C bereikt wordt.

Waarneming

De kolf, gevuld met 50 g water, bereikt eerst een temperatuur van 50 °C.

Besluit

De hoeveelheid opgenomen warmte is afhankelijk van de massa.

PROEF

We hernemen de voorgaande proef, maar nu werken we met 50 g water en 50 g norvanol (= een mengsel van water en ethanol).

Waarneming

Norvanol bereikt als eerste de temperatuur van 50 °C.

Besluit

De opgenomen warmte is afhankelijk van de aard van de stof.

De toegevoerde warmte stellen we voor door 'Q'. We hebben dus aangetoond dat:

- de toegevoerde warmtehoeveelheid Q evenredig is met de massa
- de toegevoerde warmtehoeveelheid Q afhankelijk is van de aard van de stof

Hieruit kunnen we besluiten dat: $Q = m \times \text{constante}$

Die constante noemen we de verdampingswarmte of condensatiewarmte. Ze is afhankelijk van de aard van de stof en we stellen ze voor met het symbool ' L_v '. De eenheid is J/kg.

In formule kunnen we de condensatiewarmte schrijven als:

$$Q = m \cdot L_v$$

Voorbeeld

De verdampingswarmte voor water bedraagt: $L_V(\text{water}) = 2260000 \text{ J/kg}$.

6.8 Bepalen van de verdampingswarmte van water

LABPROEF

In een calorimeter met waterwaarde u zit een massa m water op temperatuur t . Voegen we daar een massa m' damp op temperatuur t' aan toe dan zal de damp eerst water worden en dan pas zal de evenwichtstemperatuur te bereikt worden.

O.W. door calorimeter $Q_1 = u \times c_w \times (t_e - t)$

O.W. door water in calorimeter $Q_2 = m \times c_w \times (t_e - t)$

A.W. door waterdamp $Q_1' = m' \times L_V$

A.W. door water van damp $Q_2' = m' \times c_w \times (t' - t_e)$

en vermits O.W. = A.W.

$$Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2'$$

wordt $L_V = (Q_1 + Q_2 - Q_2') / m'$ in J/kg

6.9 Vragen en opgaven

1 Hoeveel warmte moeten we toevoeren om 35,5 g water van 100 °C in waterdamp om te zetten als we weten dan $L_V = 2260000 \text{ J/kg}$.

2 Bereken de verdampingswarmte van norvanol als we 2216 kJ moeten toevoeren om 100 g norvanol te laten verdampen.

3 Een massa van 34,5 g waterdamp op 100 °C wordt in 500 g water van 20 °C geleid. De eindtemperatuur is 60 °C. Zoek L_V .

4 In een calorimeter met waterwaarde 40 g zit 500 g water op 12 °C. Voegen we daar een massa damp op 100 °C aan toe dan vinden 535 g water na de proef. Zoek t_e als $L_V = 2260000 \text{ J/kg}$.

5 Een massa van 9 g benzeendamp van 80 °C wordt in 500 g benzeen van 20 °C geleid. De evenwichtstemperatuur is 25 °C. Bepaal L_V als $c(\text{benzeen}) = 1674 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ en $t_k(\text{benzeen}) = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. In een calorimeter met waterwaarde $u = 50 \text{ g}$ zit 500 g water op 12 °C. Voegen we daar waterdamp van 120 °C aan toe, dan vinden we na de proef 516 g water. Zoek de evenwichtstemperatuur. $c(\text{damp}) = c(\text{water})$

6.10 De koelkast

Bekijk een koelkast eens achteraan. Er zit een metalen netwerk aan verbonden dat zwart geverfd is. We noemen dat de condensor. Wanneer de koelkast werkt (de motor hoor je draaien), voelt de condensor warm aan. De ruimte binnen de kast is natuurlijk koud.

Om te vermijden dat de koelkast al te snel zou opwarmen, is ze uitgevoerd in warmte isolerend materiaal, zodat geen warmte (of in ieder geval zo weinig mogelijk) naar binnen kan.

Hoe werkt zo'n koelkast?

In principe onttrekt ze warmte aan de etenswaren en staat deze warmte opnieuw af aan de buitenlucht.

Hoe kan dat dan?

Via buizen wordt freon in de koelkast rondgepompt. Freon is een zeer vluchtige vloeistof met een erg laag kookpunt. In de verdampingsbuizen (1) verdampt de freon. De warmte die daarvoor nodig is, wordt opgenomen uit de etenswaren in de kast. Die geven dus warmte af en koelen daardoor af. De pomp (2) stuurt de freondamp naar de condensor (3). Hier wordt het freon weer vloeibaar door de druk van de pomp. Daarbij komt de warmte, die nodig was voor het verdampen weer vrij. Ze wordt afgegeven aan de buitenlucht.

Je snapt meteen dat een koelkast luchtig moet staan. Anders kan de koelkast haar warmte niet kwijt aan de buitenlucht.

Daarna stroomt de vloeibare freon via de verstuiver (4) opnieuw naar de verdampingsbuizen. (1)

Je ziet dat deze kringloop zich voortdurend herhaalt. De freon wordt telkens opnieuw gebruikt. Alleen wanneer een lek ontstaat of wanneer de koelkast ondoordacht naar de schroothoop gaat, kan freon ontsnappen en in de atmosfeer terecht komen. Dit moet vermeden worden. Je zal ook al genoeg vernomen hebben, via radio of TV, dat freon de ozonlaag aantast dus medeverantwoordelijk is voor het gat in de ozonlaag.

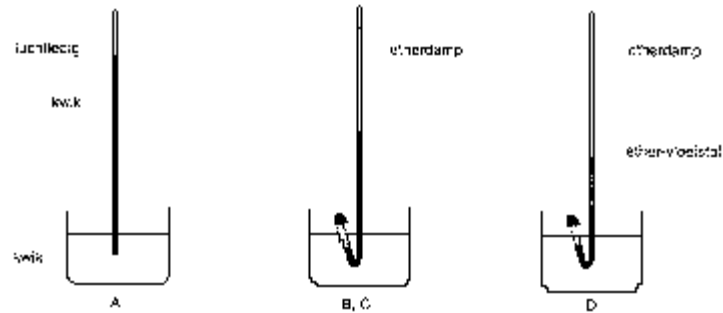
6.11 Verzadigde en onverzadigde damp

6.11.1 In theorie

PROEF: Verdamping in het luchtledige: proef van VAN MARUM

Een luchtledige ruimte kunnen we bekomen door een buis luchtledig te zuigen met de vacuümpomp. In de buis staat het kwik ongeveer 76 cm hoog en boven de vloeistof is er een luchtledige ruimte (A). Boven de capillaire buis brengen we een beetje ether. Je weet nog: ether verdampt erg gemakkelijk.

We brengen een druppel ether in de kwikbuis (B).



Waarneming

De druppel verdampt onmiddellijk en... plots daalt het kwikniveau.

Verklaring

De etherdruppel is in de luchtledige ruimte snel en volledig verdampt. Die damp oefent druk uit en duwt dus de kwikkolom naar beneden.

We voegen nog meer etherdruppels toe (C). Elke toegevoegde druppel ether geeft meer damp, grotere dampdruk en verdere daling van de kwikkolom. De damp in de luchtledige ruimte noemen we onverzadigde damp.

Als de kwikkolom ongeveer 45 cm gedaald is, gebeurt er iets vreemds. Wanneer we dan nog ether toevoegen, verdampt die niet meer maar blijft als vloeistof boven op het kwik liggen (D). Het lijkt erop dat de etherdamp geen nieuwe dampdeeltjes meer kan opnemen. De etherdamp is verzadigd. Vermits het kwikniveau niet verder daalt is nu ook de hoogste waarde van de dampdruk bereikt: de maximum dampdruk.

De maximum dampdruk is erg verschillend van vloeistof tot vloeistof. De volgende tabel geeft enkele voorbeelden bij 20 °C.

vloeistof	p_{\max} (hPa)	p_{\max} (cm Hg)
water	23	1.7
methanol	120	9.0
chloroform	211	15.8
aceton	267	20.0
diethylether	586	44.0

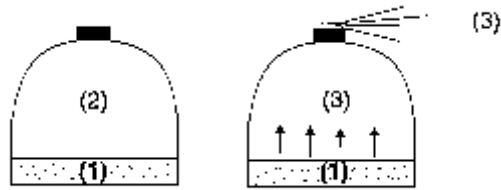
Wanneer we de cijfers in de tabel bestuderen, constateren we dat vluchtige vloeistoffen een hoge maximum dampdruk bezitten.

Besluit

Hoe hoger de maximum dampdruk van een vloeistof, hoe vluchtiger die vloeistof.

Voorbeeld

Als je gaat kamperen, heb je meestal zo'n "vloeistofdampsysteem" in of aan je rugzak zitten. We hebben het over een bus campinggas.



Zo'n bus wordt in de fabriek gevuld met vloeibaar butaan (1). Dat kun je goed horen als je met de bus schudt.

Boven het vloeistofoppervlak zit butaandamp (2) met maximum dampdruk. De damp is dus verzadigd. Wanneer je een beetje butaan in de lucht laat ontsnappen, komt de butaandamp in de atmosfeer die butaanvrij is. De damp is onverzadigd. Binnen de bus is de dampdruk gedaald beneden de maximumdampdruk. Ook die damp is onverzadigd (3) geworden. Onmiddellijk verdampt er echter nieuw butaan tot de damp weer verzadigd is.

6.11.2 In praktijk: waterdamp in de lucht

Het water in de natuur staat niet stil, het doorloopt een bepaalde kringloop, de zogenaamde waterkringloop. De kringloop wordt door de zon in stand gehouden. Door de warmte van de zon verdampt het water uit de oceanen en de zeeën. Het verdampte water zal hoog in de atmosfeer condenseren tot neerslag. Die komt voor het grootste deel weer in zee terecht en slechts voor een klein deel op het land. Van dat "landwater" verdampt er een deel, maar het grootste deel loopt via stromen en rivieren terug naar zee.

Door de verdamping van meren en zeeën komt er dus voortdurend waterdamp in de lucht. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer waterdamp de lucht kan bevatten. Vandaar dat het in de zomer minder regent dan in de winter. Die waterdamp kan je niet zien en toch is hij aanwezig.

We demonstreren dat met een aantal voorbeelden.

- Je weet dat alles in een niet verluchte badkamer vochtig aanvoelt en de spiegels beslaan wanneer je er een bad neemt. Op dat moment is de lucht in de badkamer verzadigd.
- Op sommige warme dagen voelt de lucht erg vochtig en zwaar aan. Een gedweilde vloer zal dan lang nat blijven. Ook dan is de lucht verzadigd met waterdamp.
- In de winter voelt de lucht in een verwarmde kamer soms erg droog aan. Er is dan te weinig waterdamp in de lucht. Ook boven woestijnen is de lucht meestal onverzadigd.
- Regen ontstaat doordat waterdamp in verzadigde lucht condenseert rond stofjes, druppeltjes enz. Zonder die "condensatiekernen" blijft het water zelfs dampvormig als de verzadigingsgrens is overschreden. Dergelijke lucht is oververzadigd.

Schematisch

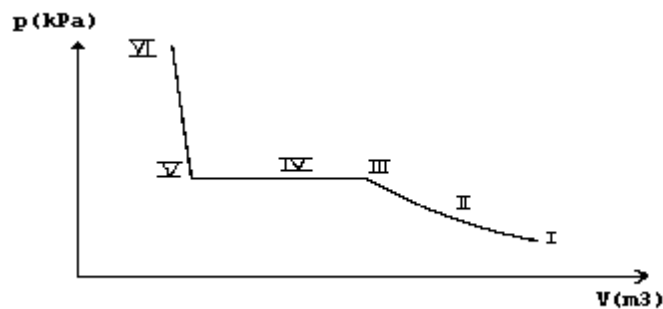
Een vloeistof kan verdampen in het luchtledige.
 Zolang de vloeistof kan verdampen zeggen we dat de damp onverzadigd is.
 Zodra de vloeistof niet meer verdampt, is de damp verzadigd. De dampdruk bereikt dan haar hoogste waarde: de maximum dampdruk.

6.12 Aanpassen van de diagrammen

6.12.1 Het p(V)-diagram

Wil men nu in een grafiek het verband tussen p en V uitdrukken, dan zal men de isothermen moeten aanpassen, want er zijn nu twee soorten dampen. De onverzadigde dampen volgen de algemene gaswet, de verzadigde dampen volgen de algemene gaswet niet. We stellen echter vast dat bij constante temperatuur p_{\max} onafhankelijk is van het volume.

Het nieuwe p(V)-diagram ziet er als volgt uit:



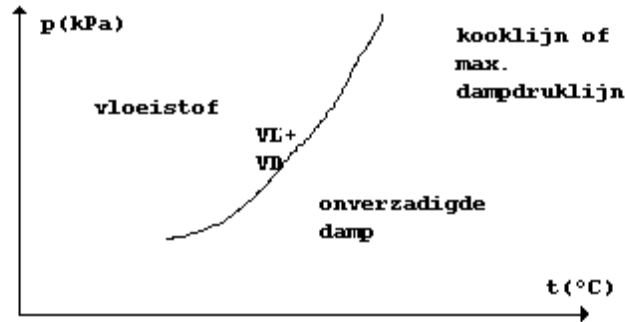
I tot III: onverzadigde damp, een hyperbool

III tot V: verzadigde damp en vloeistof, een rechte lijn

V tot VI: vloeistof, een steile curve (moeilijk samendrukbaar)

6.12.2 Het p(t)-diagram

Vermits er twee soorten dampen zijn zullen we ook het p(t)-diagram moeten aanpassen. Zoals we een smeltlijn hebben getekend, zo kunnen we ook een maximumdampdruklijn uitzetten. Deze maximumdampdruklijn geeft voor elke temperatuur de overeenkomstige maximum dampdruk. Daar een vloeistof kookt bij die temperatuur waarbij haar maximum dampdruk gelijk is aan de druk boven het vloeistoffoppervlak, dit is het normaal kookpunt. Men noemt de maximumdampdruklijn dan ook de kooklijn.



LABPROEF

We bepalen de maximumdampdruklijn van water tussen 40 °C en 100 °C. We starten aan 100 °C en laten de damp per 5 °C afkoelen.

6.12.3 Wat is condenseren?

Wensen we nu een onverzadigde damp te condenseren, dan moeten we eerst de dampdruklijn overschrijden. Uit het $p(t)$ -diagram zien we dat het condenseren op 3 verschillende manieren kan gebeuren. In het punt D is er onverzadigde damp, die we eerst moeten verzadigen om te kunnen condenseren.

methode a: bij $t = c^{te}$ p stijgt isotherm

methode b: bij $p = c^{te}$ t daalt isobaar

methode c: bij $V = c^{te}$ p en t veranderen isochoor

6.12.4 Wet van de koude wand of wet van Watt

PROEF

Twee kolven worden door een dunnere buis verbonden. Verwarmen we de ene kolf dan stroomt alle vloeistof naar de koude kolf. Er is een vloeistofstroom van de warme kolf naar de koude kolf.



In de kolven is er vloeistof en verzadigde damp (van alcohol bijvoorbeeld). Door temperatuurstijging wordt de druk p groter in de warme kolf dan in de koude kolf, zodat de damp in de warme kolf niet meer verzadigd is en de vloeistof verdampt tot alle vloeistof verdampt is. Deze wet van Watt wordt toegepast bij proeven over distillatie.

7 GASSEN EN DAMPEN

Gas en damp... of dacht je dat deze twee woorden synoniemen waren?

7.1 Damp

Als water kookt ontstaat waterdamp die opgenomen wordt in de lucht. Lucht is een mengsel van zuurstofgas (= dizuurstof) en stikstofgas (= distikstof). De waterdamp in de lucht condenseert heel gemakkelijk.

Brildragers kennen dat maar al te goed. Je komt op een koude winterdag in de gezellig warme woonkamer en meteen 'beslaat' de bril. Dat komt natuurlijk omdat de waterdamp in de kamer condenseert tot fijne druppeltjes water op de koude glazen.

Verklaring

In een damp bewegen de deeltjes wanordelijk door elkaar. Door afkoeling gaan die deeltjes trager bewegen. Daardoor kunnen ze niet meer aan elkaar ontsnappen, zodat de cohesiekrachten overwinnen. Ook door drukverhoging worden de deeltjes dichter op elkaar geperst. Ook dan zorgen de cohesiekrachten er voor dat de damp vloeibaar wordt.

Besluit

Een damp kan gecondenseerd worden door zijn temperatuur te verlagen en/of zijn druk te verhogen.

7.2 Gas

Gassen kunnen ook vloeibaar gemaakt worden. Meestal heeft dat heel wat meer voeten in de aarde dan het vloeibaar maken van een damp. We bespreken twee historische proeven voor de productie van vloeibaar gas.

7.2.1 De Faraday-methode

In het linkerbeen van een dikke glazen L-buis (volledig gesloten) zit een chemische stof die chloorgas (= dichloor) vrijgeeft bij verhitting. Het rechterbeen bevindt zich in een koudmakend mengsel (bv. ijs + zout). Door verwarmen ontstaat steeds meer chloorgas; de druk verhoogt dus voortdurend. Op de duur wordt het gas in het rechterbeen vloeibaar.

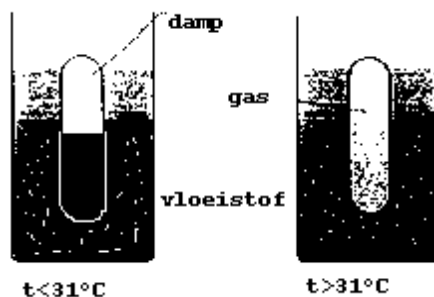
Met deze eenvoudige methode kunnen ook ammoniak en zwaveldioxide vloeibaar gemaakt worden.

Ook in een koelkast gebeurt iets vergelijkbaar. Herinner je dat het freon in de condensor vloeibaar wordt door de hoge pompdruk.

7.2.2 Kritische temperatuur en druk

Voor een aantal gassen zoals dizuurstof, distikstof, diwaterstof werkt de methode niet: zelfs bij zeer hogedrukken worden ze niet vloeibaar!

Om te begrijpen hoe dat komt, leggen we je nu de proef uit met de buis van Natterer. In een dikwandige glazen buisje zit er vloeibaar koolstofdioxide (een waterig uitzijende vloeistof) met daarboven koolstof-dioxidedamp.



Het buisje wordt in een beker water gehangen waarvan de temperatuur geleidelijk stijgt. Bij elke temperatuursverhoging verdampt er wat koolstofdioxide. De dampdruk wordt dus steeds maar groter. Bij 31 °C gebeurt er iets eigenaardig. Het scheidingsvlak (= de meniscus) tussen vloeistof en damp verdwijnt plots. In het buisje is nu nog enkel koolstofdioxide-gas aanwezig! Die 31 °C noemen we de kritische temperatuur van koolstofdioxide. Koolstofdioxidegas kan slechts vloeibaar gemaakt worden door druk, wanneer de temperatuur kleiner is dan 31 °C. De druk die daarvoor nodig is, noemen we de kritische druk. Voor koolstofdioxide bedraagt deze zeventigmaal de atmosferische druk. Vandaar het dikwandige van het glazen buisje!

Alle gassen hebben een kritische temperatuur en druk. Zo is de kritische temperatuur van distikstof gelijk aan - 147 °C. Dat is een erg lage temperatuur! Toch produceren moderne toestellen - in feite gesofisticeerde koelkasten - continu vloeibare distikstof. Misschien heb je al vloeibaar distikstof zien gebruiken bij een demonstratie van supergeleiding. Honderdvijftig jaar geleden wist men niet dat distikstof zo sterk gekoeld moest worden. Men dacht toen dat het gas helemaal niet vloeibaar te maken was en men noemde het daarom een permanent gas.

De tabel geeft je een overzicht van verschillende stoffen met hun kritische temperatuur

gas	T_{kr} (K)	ρ_{kr} (10^5 Pa)	T_{kp} (K)
helium	5.2	2.3	4
diwaterstof	33.2	13	20
distikstof	126	33.5	77
argon	151	51	87
dizuurstof	154	50	90
freon	353	31	277
ethanol	516	63	351

water 647 221 373

7.3 Gas en damp: het verschil

Dat verschil is duidelijk te merken via de tabel.

Dizuurstof bevindt zich bij onze gewone temperaturen ver boven zijn kritische temperatuur. Het kan dan ook nooit vloeibaar worden. Water bevindt zich bij gewone temperatuur ver onder zijn kritische temperatuur. Het kan bij die temperatuur dus zowel gasvormig als vloeibaar voorkomen.

Besluit

Als bij atmosferische druk en rond kamertemperatuur een stof kan voorkomen in de vloeistoffase en de gasfase, dan spreken we van damp (bv. waterdamp).

Als in deze omstandigheden enkel de gasfase voorkomt, spreken we van een gas (bv. zuurstofgas).

Schematisch

Een damp kan men condenseren door zijn temperatuur te verlagen en/of zijn druk te verhogen.

Wanneer een stof, bij kamertemperatuur en bij atmosferische druk, als vloeistof en gas kan voorkomen, spreken we van een damp.

Elk gas heeft een kritische temperatuur en een kritische druk. Een gas kan niet vloeibaar worden bij een temperatuur hoger dan de kritische temperatuur.

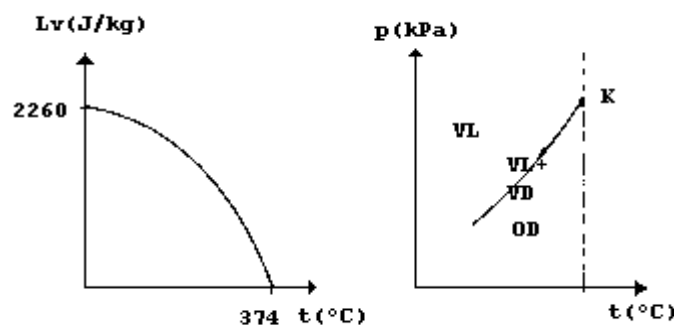
Een gas kan vloeibaar gemaakt worden door het af te koelen tot zijn kritische temperatuur en het daarna samen te persen. De kritische druk is de druk die uitgeoefend moet worden om een gas bij zijn kritische temperatuur vloeibaar te maken.

Gassen met zeer lage kritische temperatuur noemde men vroeger permanente gassen.

7.4 Gevolgen

Het bestaan van de kritische temperatuur heeft twee belangrijke gevolgen:

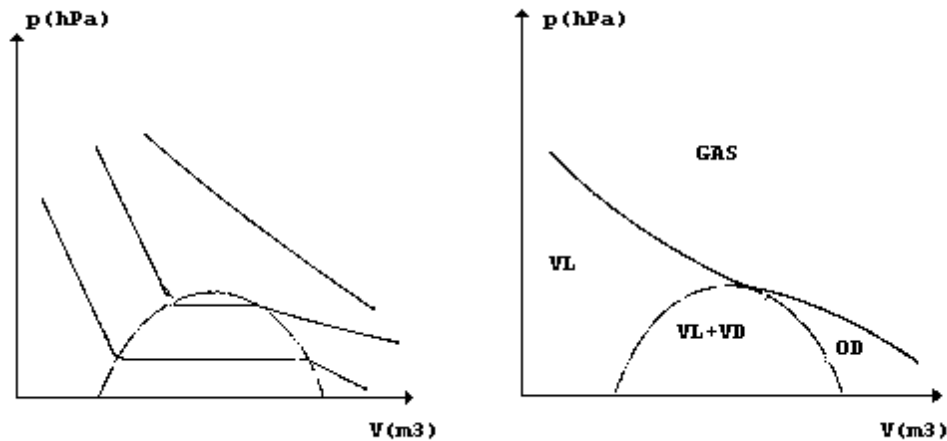
- 1) de latente verdampingswarmte L_V wordt gelijk aan nul voor t_k (zie figuur)
- 2) we stellen vast dat de kooklijn begrensd wordt door het kritisch punt K (zie figuur)



7.5 Isothermen van Andrews

Een isotherm is een lijn van constante temperatuur en wordt voorgesteld in een $p(V)$ -diagram. Wegens het bestaan van onverzadigde en verzadigde dampen worden de isothermen uitgebreid de figuur die we reeds zagen.

Met het bestaan van de kritische temperatuur moeten we het bovenstaand $p(V)$ -diagram nog uitbreiden. Deze isothermen noemt men dan de isothermen van Andrews (zie figuur) en men kan dan duidelijk het onderscheid zien tussen gassen en dampen.

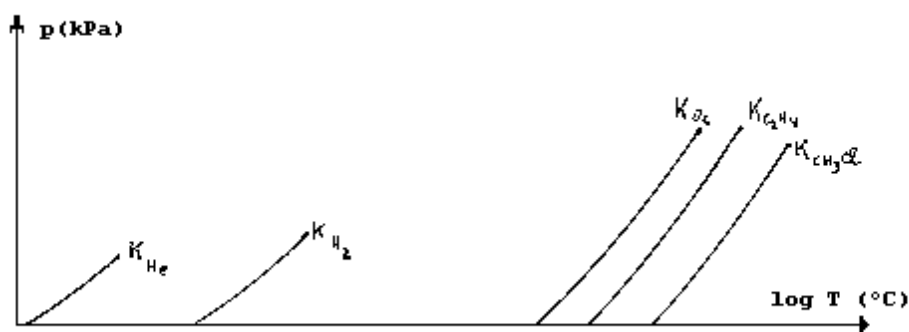


is $t < t_k$: damp
 is $t > t_k$: gas
 is $t = t_k$: t.z.t. gas damp en vloeistof

7.6 Vloeibaar maken van gassen

We hebben gezien dat er twee soorten gassen waren, nl. de condenseerbare en de permanente gassen. Nu kunnen we daar ook een fysische verklaring voor geven. Bij condenseerbare gassen is $t_{krit} > t_{kamer} > t_k$ en bij permanente gassen is $t_{krit} < t_{kamer}$. Om een permanent gas vloeibaar te maken moeten we dus eerst beneden de kritische temperatuur geraken.

De methode die we hiervoor gebruiken is de cascademethode van Pictet.



Het principe van de methode: een vloeistof die verdampt zonder warmtetoevoer van buiten daalt in temperatuur. Men laat daarom de vloeistof snel verdampen. In deze vloeistof bevindt zich een vat waarin het gas is dat men vloeibaar wenst te maken. Op de figuur is te zien dat men daarmee alle permanente gassen vloeibaar kan maken behalve He en H₂.

7.7 Temperatuurdaling bij arbeidslevering door gassen

Als we een fietsband met een fietspomp opblazen (=arbeid verrichten) dan wordt het ventiel warm. (temperatuur stijgt)

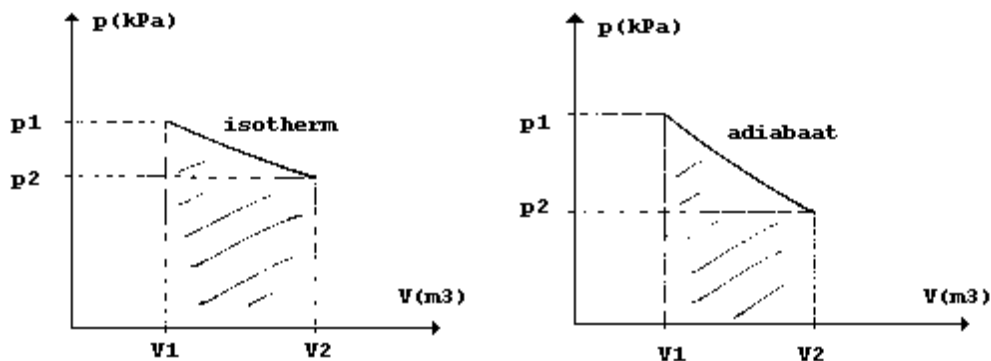
Het omgekeerde effect is dan: levert het gas arbeid dan zal de temperatuur dalen.

Veranderingen in de toestand van druk en temperatuur kunnen op 2 manieren plaatsvinden.

1) isotherme verandering: hierbij blijft de temperatuur constant en de verandering gebeurt traag.

2) adiabatische verandering: de verandering grijpt plaats zonder warmte-uitwisseling met de omgeving en gebeurt vlug (er is thermische isolatie)

Plaatsen we die 2 soorten veranderingen in een $p(V)$ -diagram:



Besluit

Bij eenzelfde volumevermeerdering van een gas is de drukverlaging bij een adiabaat groter en is de arbeid bij een adiabaat kleiner.

7.8 Joule-Kelvin effect

Dit is een methode om de laatste twee permanente gassen nl. H₂ en He vloeibaar te maken. Men laat een samengeperst gas snel ontspannen en zo koelt het af. (omgekeerde van bij fietspomp)

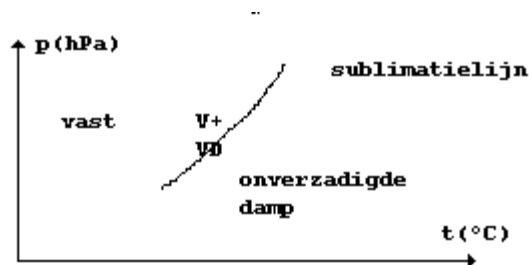
8 SUBLIMEREN

8.1 Sublimeren in de dampkring

Alle vaste stoffen blootgesteld aan de lucht sublimeren bv. fles jodium, menthol, lederen en houten meubels enz. Dit is door de geur waar te nemen. De sublimatiesnelheid zal stijgen als de temperatuur stijgt.

8.2 Sublimeren in het luchtledige

Net zoals bij verdampen houdt ook het sublimeren op als de druk van de gevormde damp een bepaalde maximumwaarde p_{max} bereikt heeft. Deze temperatuur afhankelijke lijn noemt men de sublimatielijn. In een $p(t)$ -diagram krijgen we het volgende:



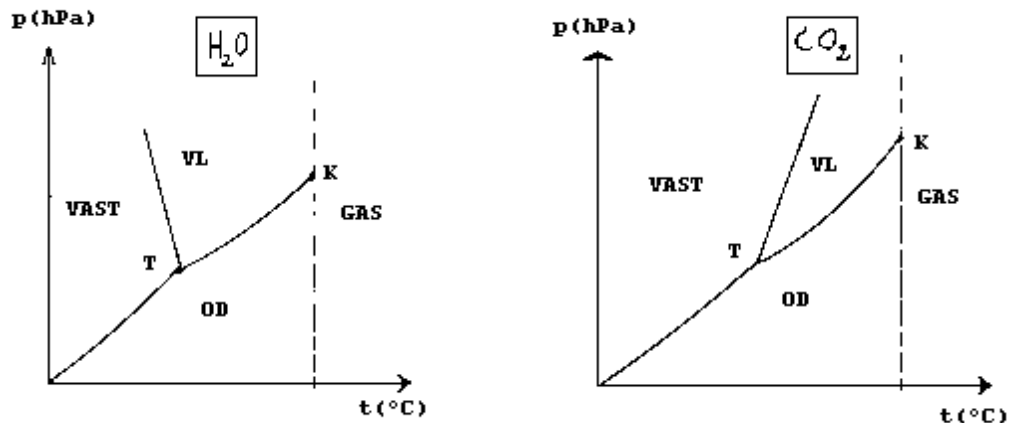
Schematisch

Alle vaste stoffen sublimeren tot gas en omgekeerd alle gassen sublimeren tot vaste stof.

In een $p(t)$ -diagram geeft de sublimatielijn de faseovergang aan tussen vaste stoffen en gassen.

TOESTANDSDIAGRAM

Alle faseovergangen tussen vaste stoffen, vloeistoffen en gassen zijn nu besproken. Resumeren we hetgeen we gezien hebben dan hebben we drie lijnen nl. de smeltlijn, de kooklijn en de sublimatielijn. Deze drie lijnen hebben een gemeenschappelijk eindpunt nl. het tripelpunt T. Zetten we nu deze lijnen uit in een $p(t)$ -diagram en houden we rekening met alle opmerkingen en gevolgen dan krijgen we het volgende:



Schematisch

Het toestandsdiagram toont in een $p(t)$ -diagram waar de verschillende fasen zich bevinden.

Op de smeltlijn is er t.z.t. vast en vloeistof, op de kooklijn is er t.z.t. vloeistof en verzadigde damp, op de sublimatielijn is er t.z.t. vast en verzadigde damp.

De smeltlijn is bij de meeste stoffen zodanig dat als de temperatuur stijgt, de druk dan daalt. Bij water is het juist omgekeerd.

De kooklijn eindigt in het kritisch punt K bij de kritische temperatuur.

Het tripelpunt T is een punt waar bij die druk en die temperatuur de stof t.z.t. in vaste, vloeibare en verzadigde dampfase kan voorkomen.

9 WARMTETRANSPORT

9.1 Op welke manier verplaatst zich de energie?

LABPROEF

In het lab bestuderen we door proeven het warmtetransport in vaste stoffen, vloeistoffen en gassen.

Verklaring

In vaste stoffen trillen de moleculen om hun evenwichtsstand. Warmtetoever betekent meer trillen. Dat trillen wordt door de naaste burens overgenomen en er is warmtetransport dat men geleiding noemt. Om het vlug te laten gebeuren moet de vaste stof echter ook nog over vrije elektronen beschikken zoals in metalen, anders gebeurt de geleiding te traag.

In vloeistoffen en gassen zijn de moleculen minder gebonden dan in vaste stoffen. Voeren we warmte toe dan zal de 'warme' molecule opstijgen door de kleinere dichtheid. Er is hier stroming, dat wil zeggen massatransport, zowel bij vloeistoffen als bij gassen.

In gassen kan de energie ook door straling getransporteerd worden. Er is hier geen massatransport, maar de energie wordt door elektromagnetische straling overgebracht zelfs in het luchtledige.

Besluiten

In vaste stoffen gebeurt het transport meestal door geleiding of conductie. In vloeistoffen gebeurt het transport door stroming of convectie. In gassen gebeurt het transport door stroming of convectie en door straling of radiatie.

Schematisch

In vaste stoffen gebeurt het transport door GELEIDING of CONDUCTIE.

In vloeistoffen gebeurt het transport door STROMING of CONVECTIE.

In gassen gebeurt het transport door STROMING of CONVECTIE en door STRALING of RADIATIE.

9.2 Vragen en opgaven

1 Waarom barst een glazen kolf, die men rechtstreeks boven een vlam zet? Waarom doet hij dit niet als er metaalgaas tussen de kolf en de vlam is?

2 Waarom is de luchtverversing in een kamer slechter indien er centrale verwarming is dan indien er een kachel brandt?

3 Waarom wordt de zoldering boven een radiator zo vlug vuil en hoe tracht men dat wel eens te voorkomen?

4 Wordt een afgesloten kamer koeler als men er een ventilator in laat draaien? Hoe komt het dat men in de buurt van de ventilator koelte voelt?

5 Schaatsrijders, die grote tochten maken, doen tussen de kleren dikwijls een laag krantenpapier. Waarom?

6 Vogels zetten in de winter, als ze stil zitten, hun veren wijd uit. Waarom helpt dit om hun lichaamswarmte te behouden?

7 Waarom is het van het grootste belang dat, bij elektrisch koken, de pannen volledig vlak op de elektrische kookplaat passen? Waarom is dit niet nodig bij koken op een gasbrander?

10 HYGROMETRIE

10.1 Relatieve vochtigheidsgraad

Hygrometrie is de leer die het meten van de vochtigheidsgraad in de lucht aangeeft. De relatieve vochtigheidsgraad is de verhouding van de druk van de aanwezige waterdamp (dauwpunt) tot de maximum dampdruk bij de heersende temperatuur (kamertemperatuur).

$$e = \frac{p}{p_{\max}} \quad \text{met } 0 < e < 1$$

Het toestel waarmee men de vochtigheid in de lucht meet is een hygrometer. De vochtigheid wordt meestal in procent uitgedrukt. In tabel 10 vind je enkele waarden.

10.2 Vragen en opgaven

1 Bij de bepaling van een relatieve vochtigheidsgraad vindt men een kamertemperatuur 15 °C en een dauwpunt 7,5 °C. Zoek de relatieve vochtigheidsgraad.

2 In een onverwarmde plaats is de temperatuur 10 °C en $e = 0,60$. Men verwarmt de plaats tot 21 °C. Wat zal e nu worden in de veronderstelling dat de hoeveelheid aanwezige waterdamp alsook het volume onveranderd bleef?

3 In een winkel van 4 m op 6 m en 2.5 m hoogte is het dauwpunt 5 °C en de relatieve vochtigheidsgraad 0.33. Bereken de temperatuur van de winkel. Bereken de totale massa waterdamp in de ruimte.

4 Men pompt 30 l lucht door een reeks buizen met hygroscopische stoffen gevuld en stelt vast dat ze een massatoename van 0.288 g vertonen. De temperatuur van de lucht is 20 °C. Zoek de relatieve vochtigheidsgraad en het dauwpunt. ($R = 8.32$ J/molK atoommassa H:1 O:16)

11 THERMODYNAMICA

11.1 Wat is thermodynamica?

De ene energievorm kan in de andere worden omgezet. Meestal tracht men uit andere energievormen nuttige arbeid te winnen. Daartoe maakt men gebruik van machines. De meeste machines trachten arbeid te winnen uit warmte. Wij noemen ze 'warmtemachines'.

De studie van dergelijke machines behoort in feite niet tot het domein van de zuivere fysica, de studie van energie-omzettingen wel. Dit laatste is het onderwerp van de thermodynamica. We bespreken enkele elementaire beginselen en behandelen de werking van enkele machines.

11.2 Het eerste beginsel

Warmte is een vorm van energie die in feite overeenstemt met de inwendige energie (symbool U).

Het eerste hoofdbeginsel van de thermodynamica legt een verband tussen de inwendige energie van een fysisch stelsel en de afgegeven of ontvangen warmte en de geleverde of ondergane arbeid.

Het gaat als volgt: Het verschil tussen de door een stelsel ontvangen warmtehoeveelheid dQ en de door dat stelsel geleverde arbeid dW is gelijk aan de aangroei van inwendige energie dU van dat stelsel.

$$dU = dQ - dW$$

Hierin is dQ als een positieve hoeveelheid te beschouwen als het gaat over warmte van buitenaf aan het stelsel geleverd, terwijl dW positief is als het gaat over een arbeid door het stelsel geleverd. Is dQ een warmtehoeveelheid door het stelsel geleverd, dan is dQ negatief. Is dW een arbeid die van buiten af op het stelsel wordt geleverd, dan is dW eveneens negatief.

Het is gemakkelijk te begrijpen als men aanneemt dat de toegevoerde warmte dQ het stelsel in staat stelt een arbeid dW te leveren, de rest komt ten goede van de moleculen, dus van de inwendige energie dU

ontvangen warmte = arbeid + verandering inwendige energie

$$dQ = dW + dU$$

Nu is het zo dat men de inwendige energie van een stelsel in een bepaalde toestand niet kan kennen. Wat men echter wel kan meten is de aangroei van inwendige energie, en het is vooral deze dU die ons het meest interesseert.

We zullen ze nu in enkele specifieke gevallen bestuderen voor stelsels bestaande uit ideale gassen (die zijn het eenvoudigst). Bij een ideaal gas hangt de inwendige energie enkel af van de temperatuur van dat gas en niet van druk en volume.

Merk op dat in werkelijkheid de toestandsveranderingen die we hieronder zullen bespreken voor werkelijke gassen sterk kunnen afwijken. De meeste thermische machines gebruiken trouwens gasvormige stoffen: stoom in stoommachine en gasmengsel in ontploffingsmotoren.

11.3 Toestandsveranderingen voor ideale gassen

a. Isobare toestandsverandering

Dit is een toestandsverandering bij constante druk. We zagen reeds dat $dU = dQ - dW$

waarbij we wisten dat $dW = p \cdot dV$, de uitwendige arbeid.

b. Isochore toestandsverandering

Dit is een toestandsverandering bij constant volume

Is de zuiger geblokkeerd, dan wordt er geen arbeid verricht, of $dW = 0$ dan is $dU = dQ$

c. Isotherme toestandsverandering

Dit is een toestandsverandering waarbij de temperatuur constant blijft.

d. Adiabatische toestandsverandering

Dit is een toestandverandering waarbij er geen warmte-uitwisseling is met de omgeving.

11.4 Het tweede beginsel

Hoewel de hoeveelheid energie constant blijft, zal de bruikbaarheid ervan verminderen. Er is dus energiedegradatie, om dit te kunnen beschrijven voert men het begrip entropie S in. Entropie is dus een maat voor de wanorde in een systeem. Entropie neemt niet af, maar toe.

$$dQ = T \cdot dS$$

11.5 Toepassingen van thermodynamica

De stoommachine, de ontploffingsmotor en de dieselmotor zijn de bekendste praktische toepassingen.

11.6 Vragen en opgaven

1 Een stoomturbine ontwikkelt 736 W gedurende 1 h, terwijl ze in totaal 0,40 kg kolen verbruikt. Als de kolen 29300 kJ/kg leveren, zoek het rendement van de turbine.

2 Het rendement van een auto bedraagt 0,20. Hoeveel kJ energie kan geleverd worden door 1 l benzine ($\rho = 0,66 \text{ g/cm}^3$; verbrandingswarmte 46046 kJ/kg)

3 Een acht cilindermotor van een auto ontwikkelt 68.4 kW bij 3200 omwentelingen per minuut. De slaglengte van de zuigers is 10.0 cm en de opp. 48 cm². Zoek de gemiddelde druk op de zuigers gedurende de expansie.

SAMENVATTING WARMTE EN ENERGIE

WARMTECAPACITEIT

Warmte die toegevoerd wordt is ofwel merkbare warmte - de temperatuur stijgt, ofwel latente warmte - de temperatuur blijft gelijk.

Bij merkbare warmte verhoogt de inwendige kinetische energie van de moleculen, bij latente warmte verhoogt de inwendige potentiële energie van de moleculen.

De warmtehoeveelheid Q wordt gegeven door de formule: $Q = m \cdot c \cdot dt$

De calorimeter zelf neemt ook warmte op, de waterwaarde is een begrip dat aanduidt met hoeveel gram water de calorimeter overeenkomt.

Alle afgestane warmte is gelijk aan de opgenomen warmte.
Dit is de wet van behoud van energie.

Warmte en arbeid zijn equivalente begrippen, dit betekent dat we warmte in arbeid kunnen omzetten en omgekeerd.

Bij gassen hebben we twee warmtecapaciteiten, nl. deze bij constant volume en deze bij constante druk.

De betrekking $M (c_p - c_v) = 8.32 \text{ J/mol K}$ levert het verband.

FASE-OVERGANGEN

Bij het smeltpunt van een vaste stof komt de vaste en vloeibare stof terzelfder tijd voor.

Onderkoeling heeft plaats als een vaste stof vloeibaar blijft beneden het smeltpunt.

Bij het smelten neemt een stof warmte op die bij het stollen weer wordt afgestaan.
De formule wordt gegeven door: $Q = m \cdot L_v$

Het volume van een stof is groter in de vloeibare fase dan in de vaste fase. Bij water is het volume in de vaste fase groter dan in de vloeibare fase, of ook het volume van ijs is groter dan dat van water.

De druk heeft invloed op de smelttemperatuur.

Als de druk stijgt zal ook het smeltpunt stijgen.

Er is weer 1 uitzondering, nl. voor water zal als de druk stijgt, het smeltpunt dalen.

In een $p(t)$ -diagram kan men de smeltlijn tekenen.

Verdamping in de atmosfeer

Een vloeistof kan kokend verdampen.

Een vloeistof kan vrij verdampen.

Vluchtige stoffen zijn vloeistoffen die bij kamertemperatuur snel verdampen.

Vrije verdamping

Vrije verdamping gebeurt enkel aan de oppervlakte van een vloeistof.

Ze gebeurt bij elke temperatuur.

De vrije verdamping van een vloeistof wordt bevorderd door:

- een hogere temperatuur
- een groter vrij vloeistofoppervlak
- wind boven het vrije vloeistofoppervlak.

Kokend verdampen

Een vloeistof kookt bij een bepaalde temperatuur. We noemen dit het kookpunt.

Zolang een vloeistof kookt blijft de temperatuur constant.

Als een vloeistof kookt, ontstaan er dampbellen binnen de vloeistofmassa. De druk binnen een dampbel is gelijk aan de atmosferische druk.

Invloed van de druk op het kookpunt

Als de druk boven een vloeistof daalt, dan daalt het kookpunt van die vloeistof.

Als de druk boven een vloeistof stijgt, dan stijgt het kookpunt van die vloeistof.

Normaal kookpunt van een vloeistof

Het kookpunt van een vloeistof bij een luchtdruk van 1013 hPa noemen we het normaal kookpunt van die vloeistof.

Verdamping vereist warmte

Om een vloeistof te laten verdampen is er warmte nodig.

Die warmte haalt de vloeistof:

- ofwel uit zichzelf (de vloeistof koelt dan af)
- ofwel uit de omgeving (de temperatuur blijft dan gelijk).

Verzadigde en onverzadigde damp

Een vloeistof kan verdampen in het luchtledige.

Zolang de vloeistof kan verdampen zeggen we dat de damp onverzadigd is.

Zodra de vloeistof niet meer verdampt, is de damp verzadigd. De dampdruk bereikt dan haar hoogste waarde: de maximum dampdruk.

Gas en damp

Een damp kan men condenseren door zijn temperatuur te verlagen en/of te verhogen.

Wanneer een stof, bij kamertemperatuur en bij atmosferische druk, als vloeistof en gas kan voorkomen, spreken we van een damp.

Elk gas heeft een kritische temperatuur en een kritische druk.

Een gas kan niet vloeibaar worden bij een temperatuur hoger dan de kritische temperatuur.

Een gas kan vloeibaar gemaakt worden door het af te koelen tot zijn kritische temperatuur en het daarna samen te persen. De kritische druk is de druk die uitgeoefend moet worden om een gas bij zijn kritische temperatuur vloeibaar te maken.

Gassen met zeer lage kritische temperatuur noemde men vroeger permanente gassen.

Bij eenzelfde volumevermeerdering van een gas is de drukverlaging bij een adiabaat groter en is de arbeid bij een adiabaat kleiner.

Alle vaste stoffen sublimeren tot gas en omgekeerd alle gassen sublimeren tot vaste stof.

In een $p(t)$ -diagram geeft de sublimatielijn de faseovergang aan tussen vaste stoffen en gassen.

Het toestandsdiagram toont in een $p(t)$ -diagram waar de verschillende fasen zich bevinden.

Op de smeltlijn is er t.z.t. vast en vloeistof, op de kooklijn is er t.z.t. vloeistof en verzadigde damp, op de sublimatielijn is er t.z.t. vast en verzadigde damp.

De smeltlijn is bij de meeste stoffen zodanig dat als de temperatuur stijgt, de druk dan daalt. Bij water is het juist omgekeerd.

De kooklijn eindigt in het kritisch punt K bij de kritische temperatuur.

Het tripelpunt T is een punt waar bij die druk en die temperatuur de stof t.z.t. in vaste, vloeibare en verzadigde dampfase kan voorkomen.

WARMTETRANSPORT

In vaste stoffen gebeurt het transport door geleiding of conductie.

In vloeistoffen gebeurt het transport door stroming of convectie.

In gassen gebeurt het transport door stroming of convectie en door straling of radiatie.