

Introductie Gaswetten

Docent: ing. A.M. de Vries
Schrijver: ing C.G.Dingemans

Inhoudsopgave:

Inhoudsopgave:.....	3
Symbolenlijst.....	4
Hoofdstuk 1. Eigenschappen van Lucht en Waterdamp.....	5
Inleiding.....	5
1.1 De (ideale) gaswet.....	5
Ideaal gas.....	5
Toestandsgrootheden.....	6
Molmassa.....	7
Getal van Avagadro.....	8
Toepassing van de gaswet.....	8
1.2 Toepassingen van de gaswet.....	9
Dichtheid (ρ) van gassen.....	9
Wet van Dalton.....	10
Vrijheidsgraden mengsel gas en damp.....	11
1.3 Beschouwing op moleculair niveau.....	12
Kinetische gastheorie.....	13
Temperatuur:.....	13
evenwicht.....	15
Relatieve vochtigheid.....	16
Formuleblad	19

Symbolenlijst.

c_p	Soortelijke warmte bij constante druk		$\text{kJ}/(\text{kg K})$
c_v	Soortelijke warmte bij constant volume		$\text{kJ}/(\text{kg K})$
H	Enthalpie		kJ
h	Specifieke enthalpie		kJ/kg
\bar{K}	(gem) kinetische energie		J
K	Constante van Stefan Boltzman (R/N_a)		J/K
M	Molmassa		gram/mol of kg/kmol
M	Massa		kg
N	Aantal moleculen		-
N_a	Getal van Avagadro		-
N	Aantal mol		mol
P	Druk		Pa of kPa
p_d	Partiële waterdampdruk		Pa of kPa
p_{ds}	Verzadigde (saturated) waterdampdruk		Pa of kPa
R	Ideale gasconstante	$R = 8,135$	$\text{J}/(\text{mol K})$
R_m	Specifieke gasconstante		$\text{J}/(\text{kg K})$
r_o	Verdampingsenthalpie van water bij $t = 0^\circ\text{C}$		kJ/kg
r_y	Stollingsenthalpie van water bij $t = 0^\circ\text{C}$		kJ/kg
T	Absolute temperatuur		K
T	Temperatuur		$^\circ\text{C}$
t_d	Dauwpuntstemperatuur		$^\circ\text{C}$
t_n	Natteboltemperatuur		$^\circ\text{C}$
T	Absolute temperatuur		K
V	Specifiek volume		m^3/kg
V	Volume		m^3
X	Waterdampgehalte		- of kg/kg
ρ	(massa) dichtheid		kg/m^3
φ	R.V. relatieve vochtigheid		- of %

Hoofdstuk1. Eigenschappen van Lucht en Waterdamp.

Inleiding.

Ongeacht of we ons binnen of buiten bevinden, ‘lucht’ is alom aanwezig. Via onze ademhaling staan we in een continue wisselwerking met de lucht in onze omgeving. Buiten spreken we over het weer, waarop we vrijwel ‘geen’¹ invloed hebben. Binnenshuis spreken we over een ‘binnenklimaat’ die we met behulp van verwarming en koeling zo goed mogelijk naar onze hand zetten.

Hoewel de lucht buiten als binnen aan dezelfde fysische wetten voldoen, beperken we ons hier tot de eigenschappen van lucht zoals deze binnen een gebouw tot uiting komen. Voor ons is lucht een mengsel van een groot aantal gassen en waterdamp. Met name waterdamp of het vochtgehalte van de lucht is, naast de temperatuur, een belangrijke grootheid voor de interactie tussen de mens en de lucht in de ruimte.

Al de voor binnenlucht relevante parameters zijn te vangen in 1 diagram, het zogenaamde toestandsdiagram, het h-x diagram voor vochtige lucht (Mollierdiagram²) of de Amerikaanse variant hiervan, de psychrometric chart. Dit diagram is af te leiden uit de enkele basiseigenschappen van gassen en water.

We zullen eerst de relevante eigenschappen van gas en waterdamp behandelen. Vervolgens het h-x diagram samenstellen en tenslotte de relevante processen uit de luchtbehandelingstechniek behandelen.

1.1 De (ideale) gaswet.

Het verschil tussen een gas en een damp is dat een gas in het beschouwde temperatuur en drukgebied zich in 1 aggregatietoestand bevindt en een damp zich tussen de vloeibare en gasfase in bevindt. Het dampevenwicht zullen we verder behandelen in § 1.3 Wanneer geen condensatie optreedt, gedraagt het dampandeel in een gasmengsel zich als een gas en voldoet het ook aan de gaswetten.

Ideaal gas

Uit de experimenten van Robert Boyle (1627-1691) en Joseph Gay-Lussac (1778-1850) volgen relaties tussen temperatuur, druk en volume van een hoeveelheid gas. Op basis van deze relatie is een toestandsvergelijking af te leiden die we de ‘Ideale Gaswet’ noemen. De toevoeging ‘Ideale’ duidt erop dat de wet niet altijd geldig is, maar gebruikt mag worden wanneer het beschouwde gas de eigenschappen van een ideaal gas benadert.

¹ Als individu hebben we een verwaarloosbare invloed, echter alle menselijke activiteit heeft wel een aantoonbare invloed op het ‘lokale’ klimaat of milieu.

² Richard Mollier, Duits natuurkundig die in het begin van de 20^e eeuw o.a. het h-x diagram voor vochtige lucht heeft samengesteld.

SKB PHBO Bouwfysica

Voor een ideaal gas geldt:

- het eigen volume van de moleculen mag worden verwaarloosd; en
- de krachtwerking tussen de gasmoleculen (vd Waalskrachten) mag worden verwaarloosd.

Voor gas onder hoge druk of temperaturen dicht bij de condensatietemperatuur gaat de benadering niet meer op. Maar voor druk en temperatuur die relevant zijn voor luchtbehandeling, mag lucht (inclusief waterdamp) beschouwd worden als een ideaal gas. Ter illustratie wordt in Vb.1.1 het verschil volume per molecuul voor een vloeistof en een gas beschouwd.

$$p \cdot V = nRT \quad (1.1)$$

met $R=8,315$ [J/(mol K)] de universele gasconstante

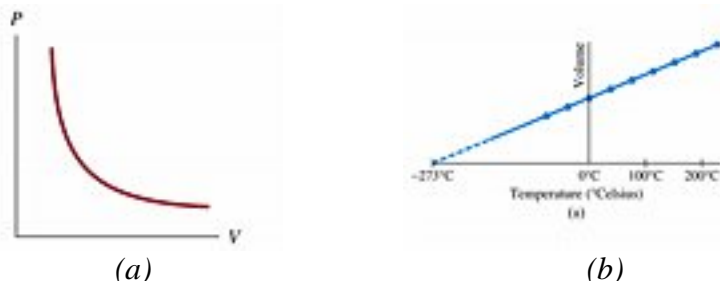
Toestandsgrootheden.

Met de grootheden druk (p), volume (V) en temperatuur (T) is de volledige toestand van een hoeveelheid n mol materie beschreven. (1.1) is een zogenaamde toestandsvergelijking van het gas. Dit betekent ook dat er ook relaties te leggen zijn tussen de toestandsgrootheden onderling.

$$p = f(V, T) \quad \text{of} \quad V = f(p, T) \quad (1.2)$$

Wanneer we resp. de temperatuur en de druk constant veronderstellen, krijgen we de wet van Boyle, resp. de wet van Gay-Lussac.

$$\frac{p}{V} = \text{constant} \Big|_{T=\text{const}} \quad \text{en} \quad V = c \cdot T \Big|_{p=\text{const}} \quad (1.3a,b)$$



figuur 1.1.1 (a) Hyperbolische relatie tussen druk en volume voor een ideaal gas
(b) Lineaire volume verandering van gas als functie van de temperatuur bij een constante druk.

Ga na dat beide leden van (1.1) de dimensie van energie [J] hebben. Dit betekent dat een verandering van de toestand alleen kan plaatsvinden wanneer er energie aan het gas toe of afgevoerd wordt. We komen hier in § 1.2 op terug.

Met behulp van andere fysische relaties is de gaswet ook in andere vorm te schrijven. In (1.4) is de hoeveelheid materie niet in mol gegeven maar in kg.

SKB PHBO Bouwfysica

$$pV = mR_m T \quad (1.4)$$

Door (1.4) aan beide zijde te delen door V krijgen we een derde vorm van de gaswet. Hierin fungeert nu de dichtheid ρ als toestandsgrrootheid.

$$p = \rho R_m T \quad (1.5)$$

Molmassa

R_m is de specifieke gasconstante voor het gas of gasmengsel en is op basis van de molmassa van het gas te berekenen uit R .

$$R_m = \frac{R}{M} \quad (1.6)$$

N.B. Door een definitieafpraak is de eenheid van molmassa **gram per mol!**

Mol is een maat voor de hoeveelheid materie, en is als volgt gedefinieerd :

1 mol bevat de hoeveelheid deeltje die overeenkomt met het aantal atomen in 12 gram zuiver koolstof.

De keuze voor 12 gram is gebaseerd op het atoommassa van koolstof. Koolstof is het zesde element in het periodiek systeem en de atoommassa wordt bepaald door de 6 protonen en 6 neutronen in de kern van het atoom.

Voor andere atomen en moleculen is de molmassa nu eenvoudig te bepalen m.b.v. het periodiek systeem.

V.b.: stikstof is het zevende element uit het periodieksysteem, met atoommassa 14. Atomair stikstof komt als zodanig niet voor in de vrije lucht maar wel als het molecuul N_2 . De massa van 1 mol stikstofgas is bij benadering $2 \times 14 = 28$ gram/mol.

In tabel 1.1 zijn de molmassa's van de gassen gegeven, zoals deze voorkomen in de lucht. Het blijkt dat de molmassa's kleine afwijkingen vertonen t.o.v. de benadering uit het voorbeeld. Dit heeft te maken met de bindingsenergie van atomen en moleculen, en volgens de beroemde formule van Einstein is massa equivalent aan energie.

Tabel 1.1 Samenstelling van (droge) lucht in de onderste lagen van de troposfeer

Component	Mol percentage	Molmassa [kg/kmol]
N_2	78,084	28,013
O_2	20,948	31,998
Ar	0,934	29,948

SKB PHBO Bouwfysica

CO ₂	0,0314	44,010
Ne	0,001818	20,183
He	0,000524	4,003
CH ₄	0,002	16,043
Kr	0,000114	83,80
H ₂	0,00005	2,016
N ₂ O	0,00005	44,013
Xe	0,0000087	131,30
Lucht	gemiddelde molmassa	28,939
Waterdamp		18

Getal van Avagadro

De link tussen het macroscopische begrip molmassa en het microscopische begrip molecuulmassa, wordt gelegd door N_a het getal van Avagadro (1776-1856). Eén mol van een stof bevat uit N_a moleculen of atomen.

$N_a = 6.0221415 \cdot 10^{23}$	1.7
---------------------------------	-----

Om een gevoel te krijgen voor de enorme grootte van dit getal:

Zou men 1 mol (dus N_a moleculen) van een kleurstof oplossen in al het water van de oceanen (inhoud ongeveer 1,34 miljoen kubieke kilometer) dan zal elke liter water nog in de orde van 500.000 moleculen kleurstof bevatten.

Toepassing van de gaswet.

Voorbeeld 1.1

Vraag: Wat is het verschil in volume van 1 mol water in vloeibare fase en 1 mol water in de gasfase bij een temperatuur van 25°C en een druk van 100 kPa

Oplossing:

M.b.v. formule 1.1 is het volume in de gasfase direct te berekenen

$$V_{damp} = \frac{nRT}{p} = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot (273,15 + 25)}{10^5} = 0,0242 m^3 \text{ of } 24,2 \text{ liter.}$$

Bij de gegeven temperatuur en druk is de dichtheid van water $\rho = 999,9 \text{ kg/m}^3$

$$V_{vloeibaar} = \frac{n \cdot M_{H_2O}}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,018}{999,9} \approx 18 \cdot 10^{-6} m^3 \text{ dat is } 18 \text{ ml.}$$

antwoord:

Een molecuul in de gasfase heeft ruim 1344 meer vrije ruimte dan in de vloeibare fase.

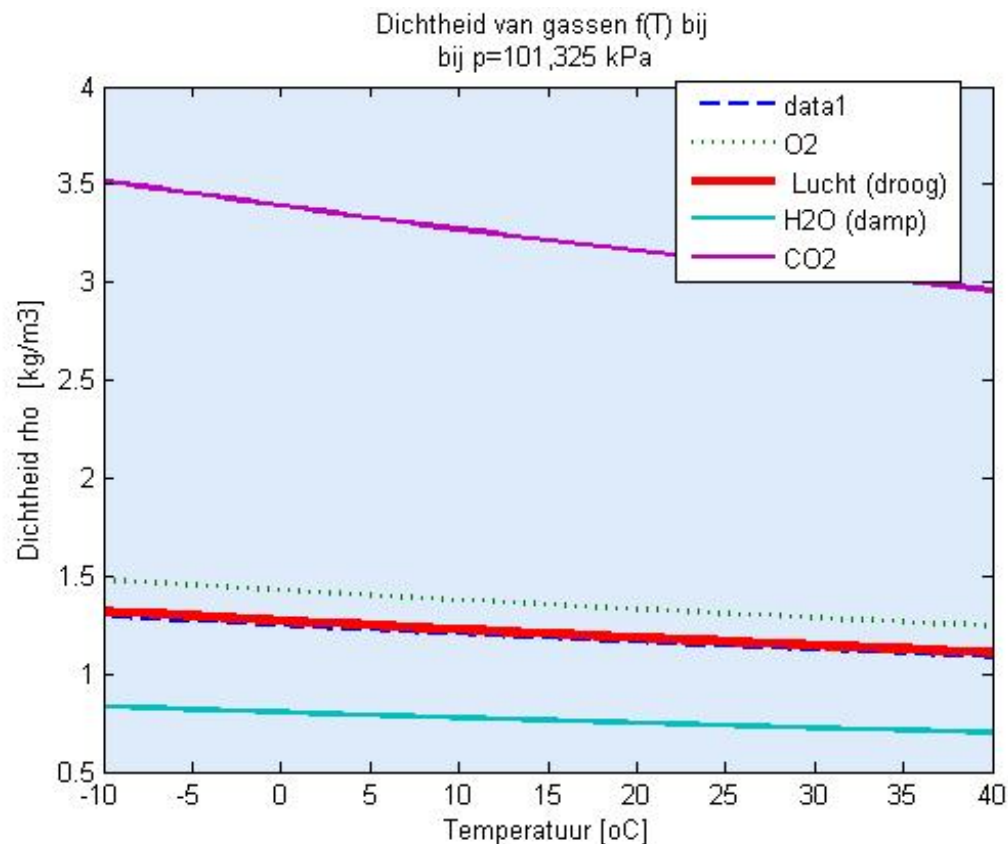
Ga na dat :

- het voor het gasvolume geen verschil maakt of het water, zuurstof of stikstof betreft.
- de gevonden verhouding gelijk is aan de dichtheidsverhouding wanneer men formule 1.5 gebruikt.

1.2 Toepassingen van de gaswet

Dichtheid (ρ) van gassen.

In voorbeeld 1.1 is te zien dat het volume van het gas alleen bepaald wordt door het aantal deeltjes en niet door het type soort gas. Het verschil in dichtheid van verschillende gassen wordt bepaald door het verschil in molmassa. In figuur 1.2.1 is m.b.v. formule 1.5 de dichtheid van gas als functie van de temperatuur gegeven. De druk is hierbij constant verondersteld ($p=101,325$ kPa). Dit komt overeen met de gemiddelde luchtdruk op zeeniveau.



figuur 1.2.1 Dichtheid van gassen als functie van de temperatuur, bij een constante druk van $p=101,325$ kPa

Uit fig.1.2.1 blijkt dat de dichtheid van de belangrijkste componenten (N_2 en O_2) van lucht, ongeveer 1 tot $1,5$ kg/m^3 is. CO_2 heeft duidelijk een grotere dichtheid en water damp een lagere dichtheid dan lucht. Verder neemt de dichtheid af bij toenemende temperatuur.

- De afnemende dichtheid bij toenemende temperatuur $\rho : \frac{1}{T}$, is de reden waarom warmere lucht zal opstijgen (Wet van Archimedes).

SKB PHBO Bouwfysica

- Lucht met een toenemend aandeel waterdamp heeft een lagere gemiddelde molmassa en de dichtheid van het mengsel zal afnemen. Dus ook vochtigere lucht zal opstijgen in minder vochtige lucht. Dit effect is belangrijk voor de meteorologie, maar is in de klimaattechniek verwaarloosbaar.
- De samenstelling van de atmosfeer verandert ten gevolge van de dichtheidsverschillen ook met de hoogte. Ten gevolge van zwaartekracht neemt de concentratie van zwaardere gassen af met de hoogte.

Wet van Dalton.

Zoals we al in tabel 1.1 en fig. 1.2.1 gesuggereerd hebben, gedraagt een mengsel van gassen zich ook als een gas. Voor de gaswet volgens (1.1) is alleen het aantal deeltjes van belang. Wanneer we een mengsel van 2 gassen beschouwen, volgt:

$$pV = (n_a + n_b)RT \quad \text{met } n = (n_a + n_b) \quad (1.8a,b)$$

Wanneer we delen door het volume, volgt

$$p = (n_a + n_b) \frac{RT}{V} \quad \text{of} \quad p = n_a \frac{RT}{V} + n_b \frac{RT}{V} \quad (1.9a,b)$$

Als we schrijven,

$$p_a = n_a \frac{RT}{V} \quad \text{en} \quad p_b = n_b \frac{RT}{V} \quad (1.10a,b)$$

volgt:

$$p = p_a + p_b \quad (1.11)$$

p_a en p_b noemen we de partiële drukken van respectievelijk component a en b. Uitdrukking (1.11) noemen we **de wet van Dalton** (1766-1844). Voor mengsel met meerdere component zoals lucht kunnen we dit veralgemeniseren tot:

$$p = \sum_{i=1}^N p_i \quad \text{met} \quad p_i = n_i \frac{RT}{V} \quad (1.11a,b)$$

Voor de luchtbehandeling is het mengsel van droge lucht en waterdamp van belang. We gebruiken daar niet de verhouding in molen maar de massaverhouding x (kg/kg) gebruikt. In voorbeeld 1.2 wordt de dampdruk van waterdamp in een luchtmengsel bepaald. In de volgende paragrafen zullen we zien dat de dampdruk in relatie tot de temperatuur bepalend is voor de hoeveelheid vocht die door de lucht kan worden opgenomen.

Voorbeeld 1.2 Partiële waterdampdruk in luchtmengsel mengsel.

Vraag: Wat is de partiële waterdamp druk in een mengsel van 20 gram water 1 kg lucht ($x=20\text{gram/kg}$) bij een temperatuur van $t=20^\circ\text{C}$ en een druk van $p=101.325\text{ kPa}$.

Oplossingstrategie:

De som van drukken is gelijk aan p, het aandeel van de waterdamp druk wordt bepaald door de mol-verhouding van droge lucht en waterdamp.
 Bereken het aantal molen lucht resp. waterdamp.
 Bereken uit de mol-verhouding en p, de partiële drukken van lucht resp. water.

Gegevens:

$$M_l \approx 28,9 \text{ kg / kmol}$$

$$M_d \approx 18 \text{ kg / kmol}$$

Oplossing:

$$n_l = \frac{m_l}{M_l} \quad n_d = \frac{x \cdot m_l}{M_d} \quad p_d = \frac{n_d}{n_l + n_d} p = \frac{\frac{x \cdot m_l}{M_d}}{\frac{m_l}{M_l} + \frac{x \cdot m_l}{M_d}} \cdot p$$

m_l valt uit de formule, vervolgens teller en noemer $\times M_d$ geeft

$$p_d = \frac{x}{\frac{M_d}{M_l} + x} \cdot p \quad (1.12)$$

Invullen geeft:

$$p_d = \frac{0,01}{\frac{18}{28,9} + 0,01} \cdot 101,325 = 1,6 \text{ kPa}$$

Formule (1.12) vindt wordt in de psychometrie vaak geschreven als:

$$p_d = \frac{x}{0,622 + x} \cdot p \quad (1.13)$$

Formule (1.13) geeft een relatie tussen de lucht damp verhouding x en de partiële waterdamp druk p_d .

Oefening: leidt uit (1.12) de inverse relatie $x=f(p_d)$ af.

N.B. Merk op dat we voor het beschrijven van een mengsel van gas en damp een extra coördinaat nodig hebben om het gedrag volledig te kunnen beschrijven. Dit kan zowel de mengverhouding x zijn of de partiële druk van de waterdamp of lucht.

Vrijheidsgraden mengsel gas en damp.

Is een enkelvoudig gas te beschrijven met 2 coördinaten $\{ p = f(V, T); \quad V = f(p, T) \text{ enz.}$), maar voor een mengsel gas en damp is extra informatie nodig over de samenstelling ervan b.v. $\rho = f(p, T, x)$

Een consequentie hiervan is dat de eigenschappen niet meer in een 2-d grafiek kan worden afgebeeld.

Een oplossing hiervoor is door 1 van de grootheden als constant te beschouwen. Voor het mollier (h-x) diagram heeft men ervoor gekozen de druk constant te veronderstellen. Men heeft gekozen voor de gemiddelde luchtdruk op zeeniveau:

$$p_0 = 101,325 \text{ kPa}$$

Alle relevante grootheden in het h-x diagram zijn dan weer te beschrijven met 2 coördinaten en in 1 diagram weer te geven.

Voor situaties met een afwijkende luchtdruk, kan men vervolgens de gaswetten gebruiken om alsnog de relevante grootheden te berekenen. Denk hierbij b.v. aan gebouwen op hoogte waar de luchtdruk fors lager³ is (ca. 10 kPa per kilometer), of het binnenklimaat in vliegtuigen gedurende de vlucht ($p < 80 \text{ kPa}$), of aan het werk in tunnels of de offshore waar onder hogere luchtdruk wordt gewerkt.

Een andere hoogte heeft met name invloed op de dichtheid en, zoals we later zullen zien, ook op de relatieve vochtigheid.

Door de gaswet (1.1) en (1.4) zijn dan eenvoudige corresponderende relatie af te leiden. Op de gevolgen voor relatieve vochtigheid komen we later terug.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1.14)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad \text{of} \quad p_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot p_1 \quad (1.15a,b)$$

1.3 Beschouwing op moleculair niveau.

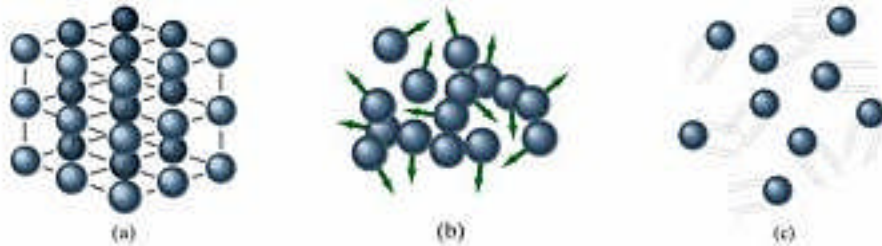
Zoals al in §1.1 opgemerkt is zowel de dimensie van pV als nRT die van energie [Joule]. Het toe- en afvoeren van energie zal van invloed zijn op de 'toestand' van het gas. Om een proces als verdampen en condenseren inzichtelijk te maken, zullen we eerst (§1.3.1) eerst op het niveau van moleculen (microscopische schaal) naar gas en vervolgens vloeistof en vaste stof kijken.

§1.3.1 Moleculaire beschouwing van T en p.

In figuur 1.3.1 zijn de aggregatie toestanden schematisch weergegeven. Om voor b.v. water van de vaste, naar de vloeibare en vervolgens naar de gasfase te gaan, weten we dat we energie (meestal warmte) moeten toevoeren. Een belangrijke graadmeter hiervoor is

³ Voor de Amerikaanse variant van het h-x diagram de 'psychrometric chart' zijn ook diagrammen voor lagere luchtdrukken gemaakt.

de temperatuur. Naarmate we meer energie toevoeren, stijgt de temperatuur, behalve bij de z.g.n. fase overgangen waarbij de temperatuur (en druk) constant blijft en een steeds toenemende deel van de stof overgaat naar de vloeibare resp. gasfase.



figuur 1.3.1 *Moleculaire interpretatie van de vrijheidsgraden en inwendige energie:*

- (a) *Vaste stof: moleculen op vaste positie, energie in de vorm van roostertrillingen tussen de afzonderlijke moleculen .*
- (b) *Vloeistof: moleculen kunnen vrij bewegen, bindingsenergie tussen de afzonderlijke moleculen (v/d Waalskrachten)*
- (c) *Gas: moleculen bewegen zich als vrije deeltjes, de inwendige energie komt overeen met de kinetische energie van de moleculen.*

Kinetische gastheorie

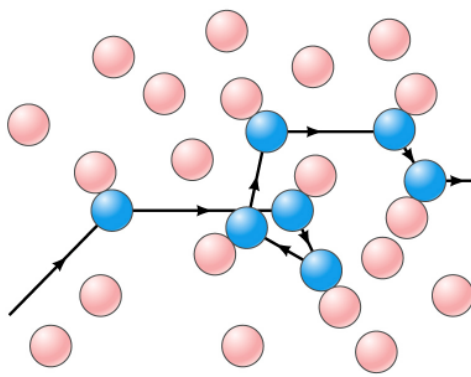
In de gasfase is de afstand tussen de moleculen zodanig groot dat de onderlinge aantrekkingskrachten te verwaarlozen en dat botsingen tussen de moleculen als perfect elastisch beschouwd kunnen worden. M.b.v. de kinetische gastheorie is vervolgens een relatie te leggen tussen de gemiddelde kinetische energie van de moleculen en de temperatuur :

Temperatuur:

$$\bar{K} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot KT = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_a} T \quad (1.16)$$

Wanneer de temperatuur stijgt, neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen toe en dus ook de temperatuur. Een gasmolecuul kan in 3 dimensie (x,y,en z) bewegen en elke 'vrijheidsgraad' vertegenwoordigt $1/2kT$ aan energie. Ook voor gebonden moleculen in vloeibare en vaste toestand is correspondeert de bewegingsenergie met de temperatuur. De moleculen hier worden echter door de bindingsenergie (potentiële energie) op hun plaats gehouden.

De totale energie is verdeeld over het grote aantal moleculen, elke molecuul heeft een andere snelheid en door botsingen wordt telkens energie uitgewisseld.(figuur 1.3.2)

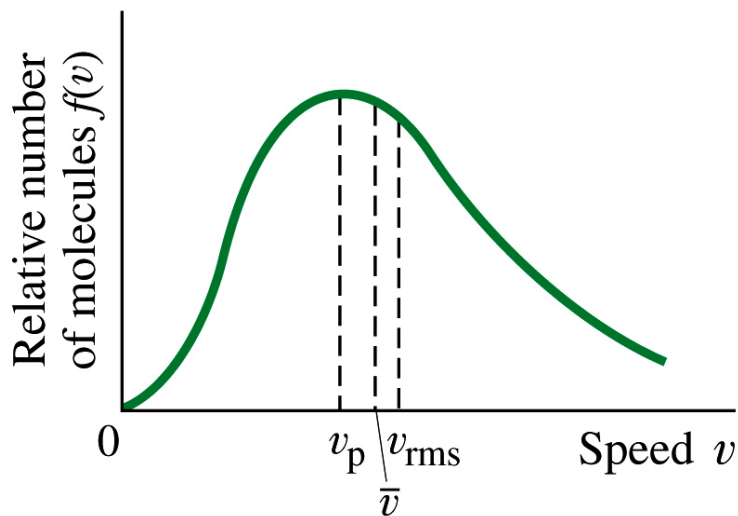


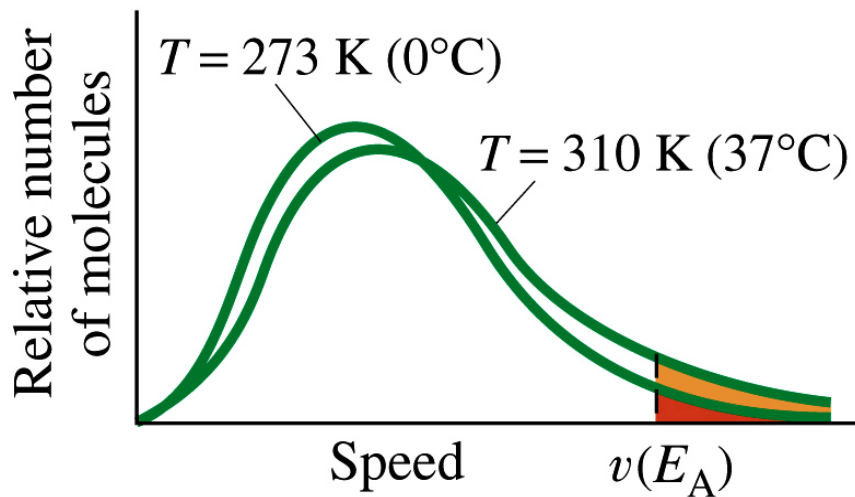
figuur 1.3.2 *Energie uitwisselingen door botsingen tussen moleculen.*

Maxwell en Boltzmann hebben een verdelingsfunctie van deze snelheden afgeleid (1.17)

$$f(v) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{1}{2} \frac{mv^2}{kT}} \quad (1.17)$$

Wanneer we deze verdeling uitzetten in een grafiek (figuur 1.3.3) zien we dat een klein gedeelte van de moleculen door opeenvolgende botsingen een grote snelheid kunnen bereiken.





(a)

(b)

figuur 1.3.3 Snelheidsverdeling van Maxwell/Boltzmann in (a) zijn v_p maximum van de kromme, \bar{v} de gemiddelde snelheid en v_{rms} de kwadratisch gemiddelde snelheid getekend. In (b) is te zien dat bij het stijgen van de temperatuur de snelheden in het gas toenemen.

Vertalen we dit ook naar de moleculen in een vloeistof kunnen we het proces van verdamping en condensatie kwalitatief verklaren.

De moleculen vlak aan het oppervlak hebben een gelijke snelheidsverdeling als de moleculen in het gas. Echter de gemiddelde snelheid is onvoldoende om aan de v/d Waalskrachten te kunnen ontsnappen, behalve voor de moleculen in het staartje van de v_d verdeling. Deze hebben voldoende snelheid om aan de vloeistof te kunnen ontsnappen. Vlak boven het wateroppervlak neemt het aantal vrije moleculen toe, door botsingen met luchtmoleculen zullen een gedeelte van de moleculen ontsnappen, maar een groot gedeelte zal ook terugvallen naar de vloeistof.

- De stroom moleculen van vloeistof \rightarrow gas wordt bepaald door de temperatuur van de vloeistof, bij stijgende temperatuur wordt deze groter.
- De stroom moleculen van gas \rightarrow vloeistof wordt bepaald door de het aantal moleculen dat zich boven de vloeistof bevindt. Deze is de evenredig met de (partiële) dampdruk boven de vloeistof.

evenwicht

- Na verloop van tijd worden de beide stromen aan elkaar gelijk en is er sprake van evenwicht. Boven de vloeistof ontstaat verzadigde damp met dampdruk p_{ds}
- Dit evenwicht wordt bepaald door de temperatuur (van de vloeistof) en de dampdruk boven de vloeistof. In tabel 1.3.1 is de verzadigde waterdampdruk gegeven als functie van de temperatuur.

Tabel 1.3.1 Verzadigde waterdampdruk als functie van de temperatuur

t [°C]	p _{ds} [Pa]		t [°C]	p _{ds} [Pa]
0	611		22	2642
2	706		24	2982
4	813		26	3360
6	934		28	3778
8	1072		30	4241
10	1227		40	7375
12	1401		50	12335
14	1597		60	19920
16	1817		70	31160
18	2062		80	47360
20	2337		90	70110
			100	101325

(Op het formuleblad zijn ook benaderde relatie tussen T en p_{ds})

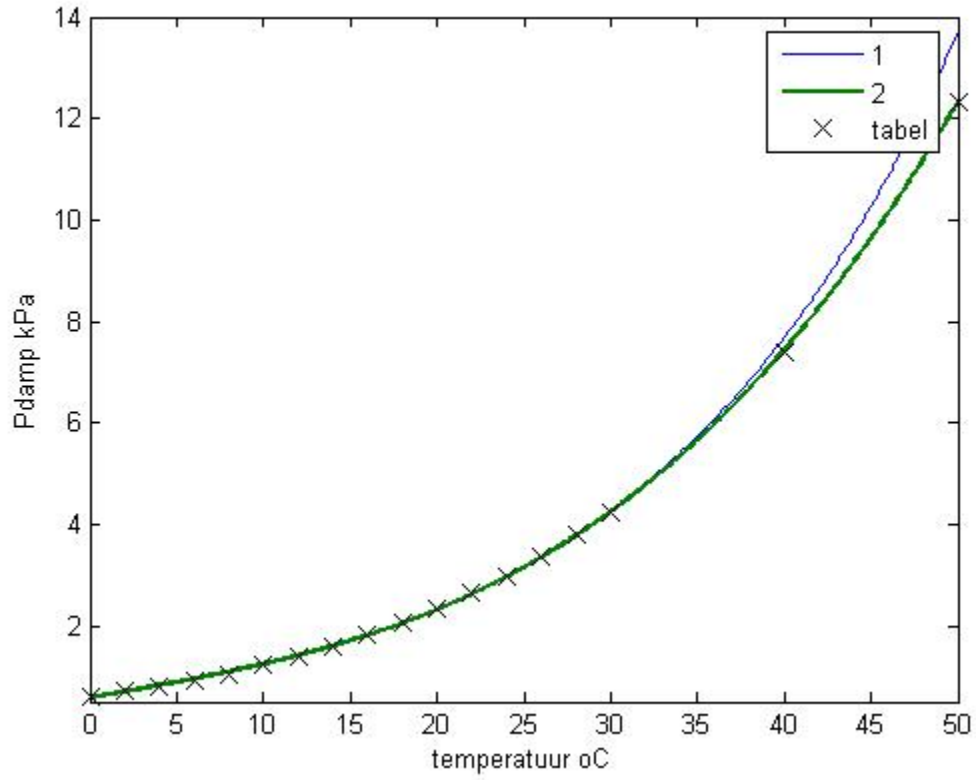
Relatieve vochtigheid.

Zolang de dampdruk p_d kleiner is dan de verzadigde dampdruk p_{ds} kan deze nog meer vocht opnemen. Deze kwaliteit wordt uitgedrukt in de ‘relatieve vochtigheid’ gedefinieerd volgens (1.18)

$$\varphi = \frac{p_d}{p_{ds}} \quad \text{of} \quad R.V. = \frac{p_d}{p_{ds}} \times 100\% \quad (1.18)$$

Tot slot:

- Doordat snelle moleculen moleculen verdampen, neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen in de vloeistof af. Door verdamping zal dus de temperatuur van de vloeistof dalen. Bij het behandelen van de natte-boltemperatuur komen we hier nog op terug.
- Ga voor jezelf na dat wanneer de luchtdruk daalt, ook de partiële dampdruk daalt, en de R.V. dus lager wordt.
- In figuur 1.3.4 zijn 2 benadering voor de dampspanningskromme getekend. Voor het temperatuurgebied tussen de 0 en 40°C is deze benadering voldoende nauwkeurig.
- Merk op dat bij 100°C de dampspanning nagenoeg gelijk is aan de atmosferische druk.



figuur 1.3.4 Benaderingskrommen voor de verzadigde dampspanning.

$$1. p_{ds} = 0,813e^{\frac{t}{17,6}} - 0,2[kPa]$$

$$2. p_{ds} = 0,0713t^3 - 0,0686t^2 + 59,971t + 580,25[Pa]$$

Vragen:

1. Welke ballon bevat meer moleculen, een ballon gevuld met 100 gram stikstof, of een ballon met 100 gram zuurstof?
2. Welke ballon uit vraag 1 heeft het grootste volume?
3. Waarom droogt de was beter buiten, dan in een afgesloten kamer?
4. Zweeten is een belangrijke manier om het lichaam te koelen. Wat is m.b.t. tot dit effect voor een timmerman een prettigere plaats om te werken, een berghut op 1000m hoogte, of caisson op de zeebodem bij een druk van 2 x de atmosferische druk? (Ga uit van een zelfde samenstelling van de lucht)
5. Waarom wordt in een vliegtuig met een cabinedruk van 80kPa de lucht als droog ervaren, ook al is de samenstelling hetzelfde als op zeeniveau?

Opgaven:

1. Hoeveel kg CO₂ bevat evenveel moleculen als 1 kg zuurstof?
2. 200 gram chips (netto volume ≈ 200ml), wordt verpakt in 1,8 liter lucht van 20°C en 100kPa. Wat moet de inhoud van de zak zijn om te voorkomen dat deze knapt:
 - a. in de woestijn bij een temperatuur van 50°C en 100kPa
 - b. op een berg bij een temperatuur van 20°C en 70kPa
3. Voor het opstijgen van het vliegtuig is de temperatuur in de cabine 20°C, de druk 101kPa en de relatieve vochtigheid 70%. Tijdens de vlucht daalt de druk tot 78kPa, de temperatuur blijft 20°C en ook de samenstelling van de lucht verandert niet. Bereken de R.V. in het vliegtuig.
4. Een helium weerballon wordt gebruikt voor meteorologische waarnemingen. De ballon incl. lading weegt 1.5 kg, bij een temperatuur van 25°C en 100 kPa
 - a. Hoeveel helium (kg) is er nodig om de ballon te laten zweven?
Om voldoende stijgkracht te krijgen wordt 0.5kg He toegevoegd.
 - b. Wat wordt de stijgkracht die de ballon ondervindt?
($g=9,8 \text{ m/s}^2$)De weerballon moet tot grote hoogte kunnen stijgen (>15 km) waarbij de luchtdruk daalt tot 30kPa en de luchttemperatuur tot -40°C
 - c. Bereken het benodigde volume van de ballon.

Antwoorden:

1. ≈ 44/32 kg
2. a. 2,18 liter (inclusief chips volume)
b. 2,7 liter
3. 54%
4. a. ≈ 0.24kg
b. ≈ 30.6 N
c. ≈ 12.1m³

Formuleblad

Formuleblad (versie 2) Gaswetten & h-x (Mollier) diagram																																																		
<p>Ideale gaswet: $pV = nRT$ $pV = mR_m T$ $p = \rho R_m T$ Dalton: $p_{tot} = \sum_i p_i = \frac{RT}{V} \sum_i \frac{m_i}{M_i}$</p>	<p>Vochtige lucht $h = c_{p,l} * t + x(r_o + c_{p,d}t)$ $x = \frac{m_d}{m_{dl}}$ $m_{tot} = m_{dl}(1 + x)$ $p_d = \frac{p \cdot x}{0.622 + x}$ $x = 0.622 \frac{p_d}{p - p_d}$ $\rho = 219,3 \frac{(1 + x)}{(0,622 + x) * (t + 273,15)} [kg / m^3]$ met: $\frac{p}{R_{m,d}} \approx 219,3 [kg / m^3]$ Benaderingen voor verzadigde dampspanning: $p_{ds} = 0,813e^{\frac{t}{17,6}} - 0,2 [kPa] \quad (t < 40^\circ C)$ $p_{ds} = 0,0713t^3 - 0.0686t^2 + 59,971t + 580,25 [Pa]$</p>	<p>Omrekenen. druk: 1 atm = 101,3 kPa 1 bar = 100kPa 1 torr = 133,3 Pa</p>																																																
<p>Verzadigde dampdruk</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 2px;">t [°C]</th> <th style="padding: 2px;">p_{ds} [Pa]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>611</td></tr> <tr><td>2</td><td>706</td></tr> <tr><td>4</td><td>813</td></tr> <tr><td>6</td><td>934</td></tr> <tr><td>8</td><td>1072</td></tr> <tr><td>10</td><td>1227</td></tr> <tr><td>12</td><td>1401</td></tr> <tr><td>14</td><td>1597</td></tr> <tr><td>16</td><td>1817</td></tr> <tr><td>18</td><td>2062</td></tr> <tr><td>20</td><td>2337</td></tr> <tr><td>22</td><td>2642</td></tr> <tr><td>24</td><td>2982</td></tr> <tr><td>26</td><td>3360</td></tr> <tr><td>28</td><td>3778</td></tr> <tr><td>30</td><td>4241</td></tr> <tr><td>40</td><td>7375</td></tr> <tr><td>50</td><td>12335</td></tr> <tr><td>60</td><td>19920</td></tr> <tr><td>70</td><td>31160</td></tr> <tr><td>80</td><td>47360</td></tr> <tr><td>90</td><td>70110</td></tr> <tr><td>100</td><td>101325</td></tr> </tbody> </table>	t [°C]	p _{ds} [Pa]	0	611	2	706	4	813	6	934	8	1072	10	1227	12	1401	14	1597	16	1817	18	2062	20	2337	22	2642	24	2982	26	3360	28	3778	30	4241	40	7375	50	12335	60	19920	70	31160	80	47360	90	70110	100	101325		
t [°C]	p _{ds} [Pa]																																																	
0	611																																																	
2	706																																																	
4	813																																																	
6	934																																																	
8	1072																																																	
10	1227																																																	
12	1401																																																	
14	1597																																																	
16	1817																																																	
18	2062																																																	
20	2337																																																	
22	2642																																																	
24	2982																																																	
26	3360																																																	
28	3778																																																	
30	4241																																																	
40	7375																																																	
50	12335																																																	
60	19920																																																	
70	31160																																																	
80	47360																																																	
90	70110																																																	
100	101325																																																	
<p>Eigenschappen van 'vochtige' lucht. Molmassa: $M_1 = 28,8 kg / kmol$ $M_d = 18 kg / kmol$ $M_d / M_l = 0,622$ Ideale gasconstante: $R = 8,315 J/mol K$ Specifieke gasconstante: $R_m = \frac{R}{M} kJ / kgK$ Getal van Avagadro: $N_a = 6.022 \cdot 10^{23} mol^{-1}$ $c_{p,l} = 1.00(6) kJ / kgK$ $c_{p,d} = 1.88 kJ / kgK$ $c_{p,w} = 4.18 kJ / kgK$ $r_o = 2491 kJ / kg$ {bij T=273K}</p>	<p>Luchtbehandeling: Mengen van lucht: $x_m = \frac{G_1 x_1 + G_2 x_2}{G_1 + G_2} \quad h_m = \frac{G_1 h_1 + G_2 h_2}{G_1 + G_2}$ $x_m - x_a = \frac{G_b}{G_a + G_b} (x_a - x_b)$ $h_m - h_a = \frac{G_b}{G_a + G_b} (h_a - h_b)$ Ontvochtigen (koeler): $BF = \frac{h_{uit} - h_{opp}}{h_{in} - h_{opp}}$ Bevochtigen (adiabatisch): $\eta_{ad} = \frac{x_{uit} - x_{in}}{x_{max} - x_{in}}$</p>																																																	