

Allererrst een beetje wiskunde omtrent een bolvormige **ballon** of **vloeistofdruppel** of wat dat ook:

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3$$

$$\therefore r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \frac{3^{1/3}}{(4\pi)^{1/3}} \cdot V^{1/3}$$

$$\therefore \frac{1}{V^{1/3}} = \frac{3^{1/3}}{(4\pi)^{1/3}} \cdot \frac{1}{r}$$

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi \left(\frac{3^{1/3}}{(4\pi)^{1/3}} \cdot V^{1/3} \right)^2 = 4\pi \cdot \frac{3^{2/3}}{(4\pi)^{2/3}} \cdot V^{2/3}$$

$$\therefore A(V) = (36\pi)^{1/3} \cdot V^{2/3}$$

$$\therefore \frac{dA}{dV} = (36\pi)^{1/3} \cdot \frac{2}{3} V^{-1/3} = (36\pi)^{1/3} \cdot \frac{8^{1/3}}{27^{1/3}} \cdot \frac{1}{V^{1/3}} = \left(\frac{32\pi}{3} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{V^{1/3}} = \left(\frac{32\pi}{3} \right)^{1/3} \cdot \frac{3^{1/3}}{(4\pi)^{1/3}} \cdot \frac{1}{r}$$

$$\therefore dA = \frac{2}{r} \cdot dV$$

Derhalve: hoe *groter* of *kleiner* de *diameter* **2r**,
 hoe *kleiner* resp. *groter* de *oppervlaktevergroting* **dA**
 bij een of andere *volumevergroting* **dV**.

Jij weet toch ook wel uit eigen ervaring dat het opblazen van een (nieuwe) ballon vooral in het begin nogal moeilijk is?
 En voor die heel kleine ballonnetjes heb je zelfs een pompje nodig, toch?

De zogeheten *oppervlaktetenspanning* verzet zich namelijk tegen een vergroting van dat oppervlak.

Als een ballon eenmaal opgeblazen is geweest zijn de (heel erg lange polymeer)moleculen "kapot getrokken" en dan is de rek eruit. Nogmaals opblazen is dus veel gemakkelijker.

Nu ontstaat er rondom een druppel óók een *oppervlaktetenspanning* omdat de moleculen elkaar aantrekken. Daardoor zit het buitenste laagje er simpel gezegd strak omheen, als ware het een blon, een blon, een blonnetje.

Daarom geldt het "opblaasprobleem" voor vloeistofdruppels precies net zo als voor een ballon.

Elke toevoeging zorgt voor een *volumevergroting* waar de *oppervlaktetenspanning* zich dus tegen verzet, met name als de druppel piepklein is. Daarom kan waterdamp in de vrije lucht niet zo maar condenseren! Vanwege de *oppervlaktetenspanning* is het vrijwel onmogelijk om moleculen toe te voegen aan een eventueel initieel druppeltje, dat immers zéér miniem zal zijn. In een vaste stof houden de moleculen elkaar echter zelfs vast, waardoor ze niet meer vrij beweeglijk zijn en dan is er geen *oppervlaktetenspanning*. Dáárom condenseert waterdamp wel gemakkelijk op iets vast en niet zo maar vrij zwevend in de lucht. Als er stofdeeltjes in de lucht zweven kan het daar uiteraard ook op condenseren. Zulke stofdeeltjes heten dan ook condensatiekernen. Die zijn eigenlijk dus noodzakelijk.

Waterdamp kan ook rechtstreeks overgaan in ijs. Als dat op een andere vaste stof gebeurt noemen we het rijpvorming. En hoog in de lucht vriest het doodgewoon. In Nederland ligt de vorstgrens in de regel op pakweg 1.5 tot 2 km hoogte. 's Zomers uiteraard wat hoger en 's winters ligt ie wel eens op of onder de grond, nietwaar? Piepkleine *ijskristalletjes* hebben geen tegenwerkende *oppervlaktetenspanning*, maar

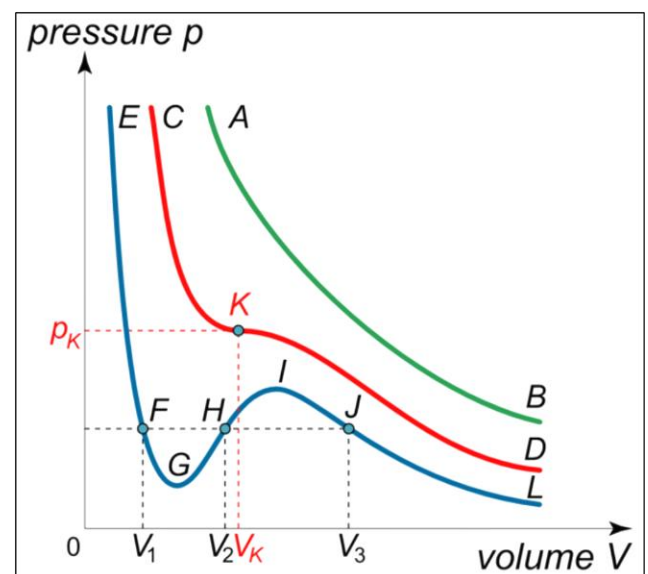
condensatiekernen helpen hier toch ook wel degelijk! En als waterdamp overgaat in **water** of **ijs** komt *condensatiewarmte* vrij (condenseren = verdichten, dus rijpvorming is in feite ook condensatie). Daardoor kunnen die **ijskristalletjes** vrijwel meteen smelten als de *temperatuur* heel dicht bij nul ligt, zeker als ze ook nog een beetje worden geholpen door zonnestraling of opgestegen warmere lucht, en dan hebben we **druppeltjes**. Zo ontstaan wolken. Via piepkleine ijskristalletje. Hooghangende bewolking bestaat altijd uit **ijskristalletjes** en laaghangende (tot pakweg 2 km hoogte) uit **druppeltjes**, maar eigenlijk zijn dat dus gesmolten **ijskristalletjes**.

Als je twee gedeeltelijk opgeblazen ballonnen met elkaar verbindt zal de *totale oppervlakte* zich minimaliseren. Daarom loopt dan, wat je wellicht raar vindt, de kleinste leeg in de grootste¹. Zo kunnen twee **druppeltjes** zich ook gemakkelijk samenvoegen tot een nieuwe **druppel** (typisch geval van $1 + 1 = 1$) omdat de *totale oppervlakte* daardoor kleiner wordt. De kleinste lost dan op in de grootste. En als er in een **druppeltjeswolk** te veel **druppeltjes** te dicht bijeenkomen zullen ze zich ook daadwerkelijk gaan samenvoegen tot **druppels**. Op een gegeven moment hebben ze dat zo vaak gedaan dat ze te zwaar zijn geworden om door opgaande luchtstromingen te worden meegenomen. Dan vallen ze dus omlaag en dat noemen we **regenen**. En als die **ijskristalletjes** niet smelten maar samenklonteren en te zwaar worden krijgen we **sneeuw**.

**Maar hoe ontstaat dan die nevelwolk boven een fluitketel? Daar vriest het toch niet?
Of zo'n ademwolkje als het wel koud is maar toch nog boven nul?
Of mist? Dan vriest het normaal gesproken toch ook niet?**

Als waterdamp wordt samengeperst komen de watermoleculen uiteraard heel dicht bij elkaar en door hun onderlinge aantrekking willen ze zich dan tot piepkleine **druppeltjes** samenvoegen, maar helaas, pindakaas, dat lukt dus niet. Ook door afkoeling ontstaat zo'n situatie, de moleculen vliegen dan langzamer en als ze elkaar passeren hebben ze dan meer tijd om elkaar aan te trekken. We noemen die situatie waarin toch nog geen condensatie optreedt oververzadiging of onderkoeling. Die heeft echter een maximum en daarboven noem ik het extreme oververzadiging/onderkoeling. Díe toestand is echter instabiel. Bij gewone condensatie treden de moleculen één voor één tot een **druppel** toe (maar 't kan ook op 'n andere tijdstip ☺). In deze instabiele toestand wachten ze echter niet meer op hun beurt. Ze gaan met z'n allen en dan ontstaan grotere **druppels** in één klap, zonder condensatiekernen.

In nevenstaande grafiek² gelden de drie curves voor verschillende *temperaturen*. Boven de **rode curve** *CKD* is het warm/heet en daar hebben we gas. Eronder is het koeler en daar hebben we links van *KF* vloeistof en rechts van *KJ* damp. Damp condenseert, gas niet. Tussen *F* en *J* hebben we damp én vloeistof. Door warmtetoevoer zal vloeistof het punt *F* naar rechts en naar boven passeren en gaan koken. Bij drukverlaging/volumevergroting gaat die naar rechts en omlaag en ook dat resulteert in koken. Beginnen we ver ter rechterzijde van *J* dan hebben we



¹ <https://www.youtube.com/watch?v=W12k1sTw-do> & <https://www.youtube.com/watch?v=rSnnScAyIij>

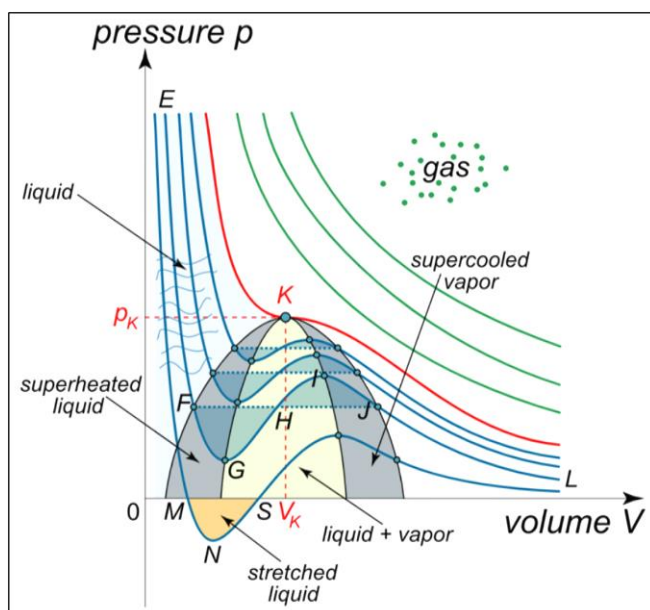
² <https://www.math24.net/van-der-waals-equation>

naarmate we verder naar links komen afkoelende of samengeperst wordende damp. Die raakt tussen *I* en *J* oververzadigd en op het "verkeerde" gedeelte *GHI* van de **blauwe curve** *EFGHIJL* zelfs extreem oververzadigd/onderkoeld. Aldaar komen de moleculen als gevolg van de volumeverkleining zodanig dicht bij elkaar dat hun onderlinge moleculaire aantrekking betekenis gaat krijgen, waardoor ze nog dichter bij elkaar komen, waardoor hun aantrekking verder vergroot, waardoor hun afstand verder verkleint, waardoor hun aantrekking verder vergroot, waardoor hun afstand verder verkleint, etc. Een zichzelf versterkend effect waardoor de boel implodeert en dan hebben we vloeistof. Dát is die instabiliteit en die schiet dus helemaal door naar links tot voorbij punt *G*. Uiteindelijk belandt het dan in punt *F* waar we alleen nog maar vloeistof hebben.

Het maximum (punt *I*) ligt nu des te lager naarmate het **kouder** is en in het volgende plaatje kun je zien dat de (van rechts komende) weg ernaartoe dan ook minder steil wordt. Dan kan die "bergtop" dus gemakkelijker worden overschreden. Zo ontstaan mist, ademwolkjes en fluitketelwolken. Extreme oververzadiging/onderkoeling. Het niet kunnen ontstaan van minieme **druppeltjes** geldt voor het *IJ*-gedeelte van de **blauwe curve**, daar is slechts sprake van gewone oververzadiging/onderkoeling die zonder condensatiekernen zo goed als onmogelijk to **druppel**vorming leidt. Een en ander is vergelijkbaar met het bevriezen van onderkoeld **water**³, alleen is het hier nu onderkoelde damp. Smelten & bevriezen is soortgelijk als verdampen & condenseren. Voor het ontstaan van mist of nevelwolken is dus extreme oververzadiging/onderkoeling nodig. Daarvan is sprake bij erg grote afkoeling of verdichting van erg veel waterdamp. En reken maar dat – ondanks eventuele tegenspraak door weerkundigen – gewone laaghangende bewolking ook echt wel vanuit extreme oververzadiging/onderkoeling kan ontstaan, zonder eerst tot **ijskristalletjes** over te gaan.

En mist kan wel degelijk bestaan als het niet al te hard vriest. De **mistdruppeltjes** bestaan dan uit onderkoeld **water**, maar niet extreem onderkoeld, hetgeen instabiel zou zijn. Zulke **druppeltjes** zullen uiteindelijk ofwel verdampen (als het warmer wordt) dan wel tot **ijs** overgaan en dan zal de mist vrij snel **uitsneeuwen**. Dat kan bij windstilte (en bij mist is dat eigenlijk altijd het geval) geruime tijd op zich laten wachten, maar zelfs bij een zacht windje kunnen de **mistdruppeltjes** al tegen elkaar gaan botsen en dan is het raak. Op straat is het overigens goed mis als het goed raak is...

Een wat vollediger versie van de vorige grafiek²:



Supercooled vapor: oververzadigde damp.

Liquid+vapor is een **slechte beschrijving**, het betreft (instabiele) extreem oververzadigde damp of extreem oververhitte vloeistof.

Stretched liquid: vergeet dat maar; voor vast/vloeibaar geldt een soortgelijk plaatje als voor vloeibaar/damp en we zijn inmiddels ver onder het equivalent van punt *G*, dus de boel is al lang bevroren.

De curves zijn zogeheten isothermen en gelden elk voor één bepaalde **temperatuur**.

"*K*" is het **kritische punt** en de **rode curve** geldt voor de bijbehorende **kritische temperatuur**, waarboven vloeistof zonder kookverschijnselen overgaat in de gasfase; boven deze **kritische temperatuur** spreken we van gas, eronder van damp.

³ <https://www.youtube.com/watch?v=ph8xusY3GTM>

Het "halve ei" heet coëxistentiegebied en daar bestaan vloeistof en damp allebei, zoals bijvoorbeeld in geval van kokend water in een waterkoker als je water kookt omdat je kokend water nodig hebt.

"Warme lucht kan meer waterdamp bevatten dan koude lucht". **Quatsch!**

De waterdamp zélf heeft een met de temperatuur toenemende verzadigingsdruk waarboven die niet dampvormig wil blijven. Daardoor kan koud water dus ook moeilijk verdampen.

Het is géén eigenschap van de lucht!

Nog zo eentje:

Warme lucht stijgt op. **Neen, driewerf neen!**

Warme lucht is lichter dan koude lucht en lichte lucht stijgt op. **Ook fout!**

Bij constante luchtdruk zorgt opwarming voor volumevergroting en afkoeling voor verkleining. Daardoor bevat een kuub koude lucht meer moleculen dan een kuub warme en is dus zwaarder. Een zware kuub wordt door de zwaartekracht harder omlaag getrokken dan een lichte. De zware duikt daardoor onder de lichte, die dan dus omhoog wordt geduwd en gaat drijven. Per saldo stijgt warme lucht dus toch wel degelijk op, maar het is géén eigenschap van die warme lucht zelf...

De door de oppervlaktespanning veroorzaakte overdruk binnenin een waterdruppel heet Laplace-druk⁴. Het is in wezen ook de druk waar je bij het ballon-opblazen tegenop moet boksen. En die stijgt dus snel naarmate de blon, de blon, het druppeltje kleiner is, dat gaat met één gedeeld door de diameter.

Voor deze Laplace-druk geldt:
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$$
 (drukverschil tussen binnen en buiten)
(Δ = Griekse hoofdletter delta en γ = gamma)

waarbij γ de oppervlaktespanning is en r de straal van de druppel.

Voor water op kamertemperatuur geldt: $\gamma = 72 \text{ mN/m}$ en dat levert:

diameter = $2r$	Laplace-druk	toelichting
5 mm	576 μbar	veel groter zijn regendruppels zelden (max. 6 mm);
2 mm	1.44 mbar	
0.5 mm	5.76 mbar	
0.2 mm	14.4 mbar	dit en kleiner heet motregen, groter heet regen;
0.05 mm	57.6 mbar	hoe kleiner de druppeltjes, hoe groter de
0.02 mm	144 mbar	luchtweerstand t.o.v. de zwaartekracht en als de
5 μm	576 mbar	druppeltjes niet vallen hebben we mist of nevel;
2 μm	1.44 bar	de Laplace-druk is nu bovenatmosferisch;
500 nm	5.76 bar	het is vrijwel onmogelijk dat watermoleculen
200 nm	14.4 bar	daar nog tegenop kunnen boksen om toe te
50 nm	57.6 bar	treden tot deze wel heel erg kleine druppeltjes;
20 nm	144 bar	
5 nm	576 bar	
2 nm	1.44 kbar	≈ 285 watermoleculen in zogeheten dichtste bolstapeling;
5 Å	5.76 kbar	4 á 5 moleculen; oppervlaktespanning
		en Laplace-druk zijn nog slechts loze kreten;
2.75 Å	8.47 kbar	nog maar één molecuul; de Laplace-druk
		heeft geen enkele fysische betekenis meer.

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Laplace_pressure

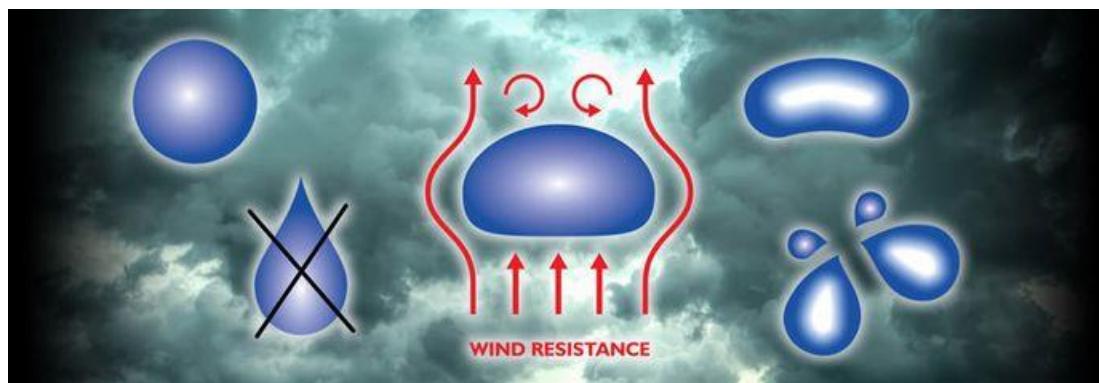
En nu ik het toch over druk en water heb even het volgende. De maximale *overdruk* die wij (bij een zogeheten Valsalvamanoeuvre⁵) op eigen kracht kunnen opbouwen is ongeveer 130 millibar⁶ ($\approx 1/8$ van de gewone luchtdruk). Bij duikapparatuur zorgt een reduceerventiel ervoor dat de *luchtdruk* onderweg van de fles (waarin die erg hoog is!) naar het mondstuk wordt teruggebracht tot de *omgevingsdruk*. Maar diep onder water is die laatste nogal hoog! Daardoor bevatten je longen op grote diepte véél onder *druk* samengeperste lucht. De *waterdruk* varieert met 0.1 bar per verticale meter en precies zo snel stijgt dan bij opstijgen de *overdruk* in de longen. **Slechts drie meter opstijgen zonder uitademen** resulteert in een *overdruk* van ruim de dubbele *Valsalva-druk* en dat **is genoeg om longschade op te lopen**. Daarom leer je op een duikcursus als een van de eerste dingen dat je tijdens het opstijgen áltijd moet uitademen en dat je nóóit je adem in moet houden. Dat geldt als je met perslucht duikt, niet als je met je blote smoel onder water gaat. Een groot *drukverschil* kan overigens ook een gescheurd trommelvlies opleveren, wat onder water ongetwijfeld bijzonder aangenaam is...

Als je véél ballonnen moet opblazen is het écht verstandig om een pompje te gebruiken!
Of het aan iemand anders overlaten...

Van alle driedimensionale figuren heeft de bol bij een gegeven *volume* de kleinst mogelijke *oppervlakte*. En *oppervlaktetenspanning* probeert de *druppeloppervlakte* te minimaliseren, met als logisch resultaat dat druppels áltijd zo goed mogelijk bolvorming zijn, zeker als er geen andere *krachten* in het spel zijn.

Vrije druppels met een spits puntje zijn onmogelijk en bestaan dus niet! Nou ja, hééél eventjes, namelijk het allerlaatste sliertje dat nog nét aan de lekkende kraan vastzat en losbrak, maar de vrijgekomen nieuwe *druppel* zal vrijwel instantaan bolvormig worden. De moleculaire aantrekking die er was tussen de kraan en het water (adhesie) is dus zo'n andere in het spel zijnde *kracht*, die op haar beurt wordt overwonnen door de *zwaartekracht*.

Luchtweerstand is er ook zo een en daardoor zijn vallende *regendruppels* aan de onderkant afgeplat. Een hogere *luchtweerstand* maakt hem steeds platter en zal op een gegeven moment van de *oppervlaktetenspanning* winnen, zodat de *druppel* uiteenscheurt in kleinere (en veel rondere!) *druppeltjes*. En eh, halve *druppels* bestaan niet...



<https://ownyourweather.com/the-real-shape-of-a-raindrop/>

Bekijk deze site maar eens, het wordt daar m.i. (mijn*s* inziens) goed uitgelegd.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Valsalva_manoeuvre

⁶ <https://www.britannica.com/science/human-respiratory-system/The-respiratory-pump-and-its-performance>

Onderstaand plaatje geeft dus een beslist verkeerd beeld van **regen!**



<https://www.pinterest.nz/pin/671036413209528682/>