

Dampf und Tropfen

Betrachtungen rund um die Luftfeuchtigkeit

Roman Dengler

Einleitung

Was hat Nebelbildung mit Schlittschuhlaufen zu tun? Auf den ersten Blick recht wenig. Unter dem Gesichtspunkt der Thermodynamik zeigen sich jedoch Gemeinsamkeiten, denn in beiden Fällen erfolgt der Übergang von einem Aggregatzustand in einen anderen. Zur Beschreibung wird jeweils eine Gleichung dienen, die von zentraler Bedeutung in der Wärmelehre ist. Mit Hilfe dieser kann man Aussagen über die Luftfeuchtigkeit ebenso machen, wie man erklären kann, warum Eis unter dem Druck der Kufen von Schlittschuhen schmilzt.

Neben der Diskussion von Anwendungsmöglichkeiten der angesprochenen Gleichung wird der Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Taupunkttemperatur ebenso aufgezeigt, wie die Bedeutung von Keimen für die Kondensation von Wasserdampf.

Die Clausius-Clapeyron-Gleichung

Die sog. Clausius-Clapeyron-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur bei Phasenübergängen. Warum schmilzt Eis unter Druck? Wie ändert sich der Siedepunkt, wenn sich der Luftdruck ändert? – Solche Fragen lassen sich dann beantworten. Um die Gleichung zu gewinnen, bedient man sich – wie bei vielen Gelegenheiten in der Thermodynamik – eines Kreisprozesses. Auf eine Herleitung wird hier verzichtet, da die Bedeutung von Kreisprozessen an einem anderen Beispiel aufgezeigt wird.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Q}{(V_1 - V_2)T} \quad (1)$$

Mit (1) haben wir die *Clausius-Clapeyron-Gleichung*, die u.a. eine Aussage über die Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks macht.

Sehen wir uns als Anwendung zwei unterschiedliche Beispiele genauer an:

a) Schmelzpunkterniedrigung

Betrachten wir ein Beispiel zum Phasenübergang *fest-flüssig*: Schlittschuhlaufen funktioniert deshalb, weil sich unter dem Druck der Kufen zwischen diesen und dem Eis ein Wasserfilm bildet, der die Reibung stark reduziert. Berechnet wird der Druck, der erforderlich ist, um den Schmelzpunkt um 1 K zu erniedrigen. Hierzu werden in (1) die entsprechenden Werte eingesetzt. Beziehen wir die Größen auf eine bestimmte Menge Wasser bzw. Eis, sagen wir 1 kg, dann gilt:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1,000 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (Wasser)} \\ V_2 &= 1,091 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (Eis)} \\ Q &= 334 \text{ kJ} \quad \text{(Schmelzwärme)} \\ T &= 273 \text{ K} \quad \text{(Der Vorgang wird bei } 0^\circ \text{C betrachtet)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{334 \text{ kJ}}{(1,000 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1,091 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \cdot 273 \text{ K}} \Delta T \\ \Delta p &= -134 \text{ bar/K} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

(Anm.: Da es sich um eine konkrete Schrittweite handelt wurde Δp bzw. ΔT anstelle von dp und dT geschrieben. Die Einheit bar statt Pascal wurde gewählt, da man sich dann eher etwas vorstellen kann.)

Für eine Erniedrigung des Schmelzpunktes um 1 K ist ein Druck von etwa 130 bar erforderlich. Damit hat man auch eine Erklärung, warum bei strengem Frost Schlittschuhlaufen nicht besonders funktioniert; der aufgebrachte Druck reicht dann nicht mehr aus, um Eis schmelzen zu lassen.

b) Höhenabhängigkeit der Siedetemperatur

Es ist wohl allgemein bekannt, daß der Siedepunkt von Wasser mit zunehmender Höhe (z.B. in den Bergen) geringer wird. Dies liegt daran, daß der Luftdruck dort geringer ist. Sehen wir uns dazu die Clausius-Clapeyron-Gleichung an. Im vorangegangenen Beispiel hatten wir den Druck zu einer gegebenen Temperaturdifferenz berechnet. Jetzt gilt es den Temperaturunterschied bei einer bestimmten Druckdifferenz zu ermitteln. Die Gleichung wird nach ΔT aufgelöst und die entsprechenden Werte werden eingesetzt.

$$\begin{aligned} V_1 &= 1,000 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (Wasser)} \\ V_2 &= 1,779 \text{ m}^3 \quad \text{(Dampf)} \\ Q &= 2265 \text{ kJ} \quad \text{(Verdampfungswärme)} \\ T &= 373 \text{ K} \quad \text{(Der Vorgang wird bei } 100^\circ \text{C betr.)} \end{aligned}$$

$$\Delta T = \frac{(1,779 \text{ m}^3 - 1,000 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \cdot 373 \text{ K}}{2265 \text{ kJ}} \Delta p$$

$$\Delta T = 0,03 \text{ K/hPa} \cdot \Delta p$$

Ein Druckunterschied von 10 hPa (dies entspricht einem Höhenunterschied von ca. 80 m) hat eine Änderung der Siedetemperatur von 0,3 K zur Folge.

Eine wichtige Bemerkung darf nicht fehlen: Durch die vorgezeichneten Beispiele könnte der Eindruck entstehen, daß die Lösungen der Clausius-Clapeyron-Gleichung immer derart einfach zu finden sind. Dem ist aber nicht so. In der Regel hängen die in der Gleichung vorkommenden Größe Q und V selbst von T ab, sind also nicht konstant. Bei den hier gezeigten Anwendungen waren die Abhängigkeiten vernachlässigbar, da nur kleine Temperatur- bzw. Druckunterschiede angenommen wurden. Hat man dagegen beispielsweise den Dampfdruck von Wasser in einem Bereich von 0°C bis 100°C zu bestimmen, so kommt man um die mühsame Integration der Differentialgleichung (1) nicht umhin. Einen Ausweg bieten in solchen Fällen spezielle Näherungsformeln wie der nächste Abschnitt zeigen wird.

Taupunkt und Luftfeuchtigkeit

Luft ist ein Gemisch verschiedener Gase. Hauptbestandteile trockener Luft sind Stickstoff (78,10 Volumen%), Sauerstoff (20,93 %), Argon (0,93 %) und Kohlendioxid (0,03 %). Dazu kommt ein wechselnder Anteil an Wasserdampf, der nicht sichtbar ist, auch wenn man weiße Wolken – etwa aus einem Kühlturm – oft als Dampf bezeichnet. In Wirklichkeit handelt es sich dabei um Kondensat in Form kleiner Tröpfchen. Auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit in der Luft kann man aber leicht indirekt schließen. Gegenstände, deren Temperatur niedriger als die Lufttemperatur ist, beschlagen sich. Es erfolgt Taubildung. Die so nachgewiesene Feuchtigkeit ist auf vielfältige Art durch Verdunstung über Land- und Seeflächen in die Atmosphäre gelangt. Bekanntlich nutzt man diesen Effekt zum Trocknen von Wäsche (auch bei Temperaturen unter 0 °C) aus.

Betrachten wir den Vorgang des Verdunstens nun etwas genauer und stellen uns dazu die ebene Oberfläche einer mit Wasser gefüllten Schale vor. Zwischen den Wassermolekülen herrschen Bindungskräfte (Kohäsion), die für einen gewissen Zusammenhalt sorgen. Aufgrund der thermischen Bewegung verlassen dennoch ständig Teilchen die Flüssigkeit, während andere sich wieder anlagern. Welcher Vorgang nun überwiegt, hängt von der bereits vorhandenen Dampfmenge ab. Wenn genügend Flüssigkeit vorhanden ist, wird Verdunstung solange stattfinden, bis der Partialdruck des Wasserdampfes (Wasserdampfdruck) in der Luft einen maximalen Wert, den sog. Sättigungsdampfdruck p_S erreicht hat. Dieser Druck hängt nur von der Temperatur, nicht aber vom Gesamtluftdruck ab. Er ließe sich prinzipiell aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung bestimmen. In der Meteorologie werden jedoch sehr gute Näherungsformeln verwendet, die bei anderer Wahl der Koeffizienten auch den Druck über Eis und unterkühltem Wasser (Temperatur unter 0 °C) zu berechnen erlauben.

$$p_S = C_1 \cdot e^{\frac{C_2 \cdot \vartheta}{C_3 + \vartheta}} \quad (2)$$

Hierbei bedeutet p_S den Sättigungsdampfdruck in hPa bei der Temperatur ϑ in °C.

	Wasser	Eis	Wasser unterkühlt
C_1	6,10780	6,10714	6,10780
C_2	17,08085	22,44294	17,84362
C_3	234,175	272,440	245,425

Die Formel zeigt, daß mit zunehmender Temperatur der Sättigungsdampfdruck steigt. Bei 100 °C erreicht er gerade den Wert von 1013 hPa (Normdruck); Wasser siedet.

Die oft gebrauchte Formulierung, daß die Luft in der Lage sei bei einer bestimmten Temperatur eine bestimmte Wassermenge aufzunehmen, ist Ausdruck einer falschen Vorstellung. Die Luft wirkt nicht wie ein Schwamm, der Feuchtigkeit aufnimmt. Die Wassermoleküle lagern sich nicht an Luftmoleküle an. Hierzu noch ein Gedankenexperiment: In einem abgeschlossenen *luftleeren* Behälter befindet sich eine Schale mit Wasser. Es wird genau soviel Wasser verdunsten, bis in dem Behälter der zur Temperatur passende Sättigungsdampfdruck p_S gemäß Formel (2) herrscht.

In der Regel ist der Wasserdampf aber nicht gesättigt. Die absolute Feuchte ist geringer als die maximal mögliche. Man be-

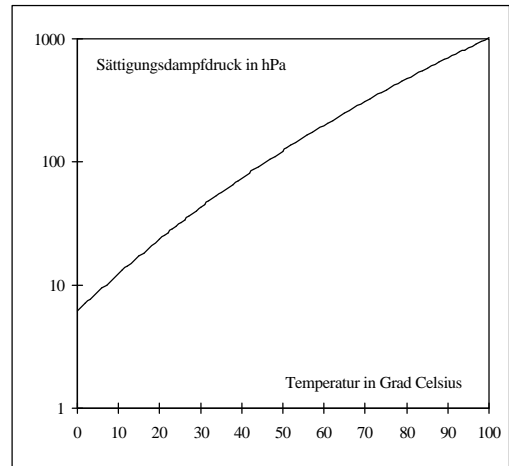
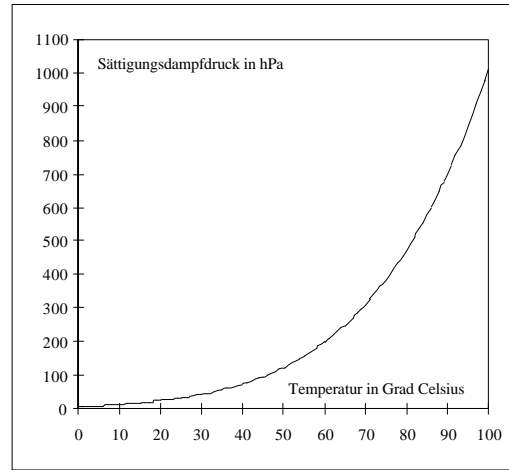


Abb. 1 und 2: Dargestellt ist der Sättigungsdampfdruck von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur. Im oberen Bild ist die vertikale Achse linear, im unteren Bild logarithmisch skaliert, um den Bereich kleiner Temperaturen besser erkennen zu können.

zeichnet den Quotienten als relative Luftfeuchtigkeit φ . Sie wird meist in Prozent angegeben.

$$\varphi = \frac{\text{absolute Feuchte}}{\text{relative Feuchte}} \quad \text{bzw.} \quad \varphi = \frac{p_D}{p_S} \quad (3)$$

Hierbei ist p_D der tatsächliche Dampfdruck (Partialdruck) und p_S der Sättigungsdampfdruck.

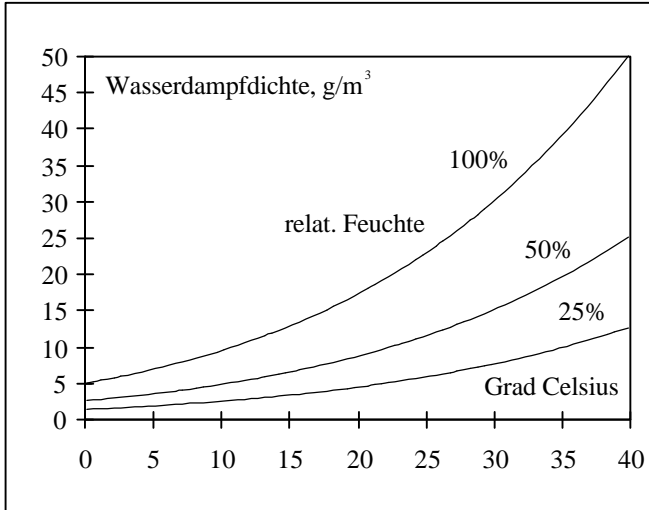
Die Frage, wieviel Wasser sich dann tatsächlich in einem bestimmten Volumen befindet, läßt sich leicht durch Verwenden der allgemeinen Gasgleichung beantworten (Abb. 3).

Aus $p \cdot V = nRT$ folgt mit $n = m/M$ dann für die Wasserdampfdichte

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p_D M}{RT} \quad (4)$$

R	Gaskonstante	$8,83143 \times 10^3 \text{ J}/(\text{K} \times \text{kmol})$
M	molare Masse (Wasser, H ₂ O)	18 kg/kmol
T	Temperatur in K	

Für 50% relative Feuchte bei 20 °C findet man beispielsweise $\rho = 8,7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.



Eine interessante Abschätzung, die jeder selbst durchführen kann, ist die Bestimmung des Verlusts an Körpergewicht während einer Nacht allein durch Befeuchten der Atemluft.

Die relative Luftfeuchtigkeit steigt bei Abkühlen des Dampf-Luftgemisches, da der Sättigungsdampfdruck sinkt. Beim "Taupunkt" tritt Kondenswasserbildung auf. Die Taupunkttemperatur ϑ_d ist also jene Temperatur, bei der der Sättigungsdampfdruck p_S gerade gleich dem wirklichen Dampfdruck p_D ist.

Die zu einer bestimmten Feuchtigkeit gehörige Taupunkttemperatur ϑ_d erhält man durch Auflösen der Gleichung (2) nach ϑ_d :

$$\vartheta_d = C_3 \cdot \ln \frac{p}{C_1} / \left(C_2 - \ln \frac{p}{C_1} \right) \quad (5)$$

Kennt man den Taupunkt – aus direkter Messung oder aus Wettermeldungen – so kann man die relative Feuchtigkeit bestimmen. Offizielle Einrichtungen bedienen sich dazu geeigneter Tabellen, mit deren Hilfe sie aus der Lufttemperatur ϑ und dem Taupunkt ϑ_d die Feuchte bestimmen können. Mit der Formel (6), die aus (2) folgt, sind wir aber in der Lage selbst eine solche Tabelle zu erstellen.

$$\varphi = \frac{e^{\frac{17,08085 \cdot \vartheta_d}{234,175 + \vartheta_d}}}{e^{\frac{17,08085 \cdot \vartheta}{234,175 + \vartheta}}} \quad (6)$$

Hierzu legen wir eine Matrix an und tragen nach rechts die Taupunkttemperatur ϑ_d und nach unten die Lufttemperatur ϑ ein. An den Kreuzungspunkten erscheint dann die Feuchte φ . Bei Verwendung des Programms Excel sieht das im Detail so aus:

- In zwei Zellen (hier Z10 und Z12), auf die dann Bezug genommen wird, stehen die Konstanten $C_2 = 17,08085$ und $C_3 = 234,175$.
- In Zeile 1 stehen ab Spalte B die Taupunkttemperaturen von 1 bis 30 Grad.
- In Spalte A stehen ab Zeile 2 die Lufttemperaturen ebenfalls von 1 bis 30 Grad.

- In Zelle B2 wird die Formel eingetragen:
`=EXP(Z10*B$1/($Z$12+B$1))/EXP(Z10*A2/(Z12+A2))*100`
- Durch anschließendes Ziehen mit der Maus füllt man die Tabelle auf.

In den entsprechenden Zellen steht dann die zu den Temperaturangaben gehörige relative Feuchtigkeit in Prozent. Als Format ist Rundung auf ganze Zahlen gewählt. Selbstverständlich können auch für andere Temperaturbereiche die Berechnungen durchgeführt werden. Hierzu sind in der 1. Zeile und 1. Spalte die entsprechenden Werte einzutragen. Bei offiziellen Angaben des Wetterdienstes ist auch bei Temperaturen unter Null Grad der Dampfdruck für Wasser zugrunde gelegt. Das heißt, daß die Konstanten C nicht zu ändern sind. Dies ist nur bei eigenen Messungen, etwa bei Reifbildung an einem Peltierelement gegebenenfalls zu tun.

Psychrometer

Die verbreitetste Methode der Feuchtemessung, die psychrometrische, mißt keine der bisher genannten Feuchtegrößen direkt. Sie beruht auf der Abhängigkeit der Verdunstung von den Feuchteverhältnissen der umgebenden Luft. Ein Psychrometer besteht aus zwei Thermometern, von denen das eine die Lufttemperatur ϑ_L mißt. Das Vorratsgefäß des anderen ist mit einem feuchten "Strumpf" überzogen und kühlt sich infolge der Verdunstung unter die Lufttemperatur ab. Seine Temperatur ϑ_F dient zusammen mit ϑ_L und dem Luftdruck p zur Berechnung der gewünschten Größen. Der Zusammenhang lautet (Dampfdruck nach Sprung):

$$p_D = p'_S - 0,000660 \cdot (1 + 0,00115 \cdot \vartheta_F) \cdot p \cdot (\vartheta_L - \vartheta_F) \quad (7)$$

Bei Eisansatz gilt (andere Verdampfungswärme und Wärmekapazität):

$$p_D = p'_S - 0,000582 \cdot p \cdot (\vartheta_L - \vartheta_F) \quad (7')$$

Zu beachten ist hier, daß p'_S der auf die Feuchtemperatur ϑ_F bezogene Sättigungsdampfdruck ist! In (7') ist der Sättigungsdampfdruck für Eis einzusetzen.

Entsprechend der Tabelle zur Bestimmung der Feuchte über die Taupunkttemperatur läßt sich auch hier z.B. mit Excel eine Übersicht erstellen. Die entscheidende Formel lautet dann allerdings:

$$= (6,1078 * \text{EXP}(17,0805 * B\$1 / (234,175 + B\$1)) - 0,00066 * (1 + 0,00115 * B\$1) * 1013,246 * (A2 - B\$1)) / (6,1078 * \text{EXP}(17,0805 * \$A2 / (234,175 + \$A2))) * 100$$

Die Temperaturbereiche und die Schrittweite können selbstverständlich auch hier nach eigenen Bedürfnissen gewählt werden.

Kleine Tröpfchen

Nimmt durch Sinken der Temperatur (z.B. durch Abkühlung in der Nacht) die relative Luftfeuchtigkeit zu, so erwartet man nach den bisherigen Ausführungen das Einsetzen von Kondensation. Die Erfahrung zeigt aber, daß die Vorgänge nicht so einfach sind. Nebel entsteht oft schlagartig, besonders dann, wenn sog. Kondensationskeime, also kleine Partikel in der Luft vorhanden sind. Wir werden diesem Phänomen etwas nachgehen.

Die durchgeführten Berechnungen für den Dampfdruck setzen eine ebene Oberfläche des Wassers voraus. Wenn aber Dampf kondensiert, müssen zunächst kleinste Tröpfchen entstehen, die erst allmählich anwachsen. Sind nun hingegen Staubteilchen in der Luft, so können sich Wassermoleküle an diesen anlagern. Es wird also nicht das Anfangsstadium durchlaufen. Worin liegt nun das "Problem" mit den kleinen Wassertropfchen? Je kleiner der Radius, umso größer ist der Dampfdruck. Das bedeutet aber nichts anderes, als daß ihr Bestreben zu verdunsten entsprechend groß ist.

Beim Vergleich des Dampfdrucks p_r eines Tropfens (mit Radius r) und dem einer ebenen Fläche p_∞ (Radius ist ∞) benötigen wir eine Größe, die aus dem Alltag bekannt ist: die Oberflächenspannung σ . Sie wirkt einer Vergrößerung der Oberfläche entgegen und ist definiert als Verhältnis von aufgewendeter Arbeit ΔW zu gewonnener Oberfläche ΔA . Für den Zusammenhang von p_r und p_∞ gilt folgende Gleichung:

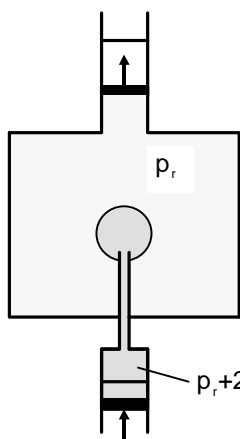
$$p_r = p_\infty \cdot e^{\frac{M}{\rho RT} \cdot \frac{2\sigma}{r}} \quad (8)$$

Mit den Werten für Wasser (bei 20 °C):

M	Molmasse	18 Kg/kmol
σ	Oberflächenspannung	$72,75 \times 10^{-3}$ N/m
ρ	Dichte der Flüssigkeit	$1,0 \times 10^3$ kg/m ³
R	Gaskonstante	$8,83143 \times 10^3$ J/(K×kmol)
T	Temperatur	293 K
r	Tröpfchenradius	

Diese Gleichung gewinnt man mit Hilfe eines geeigneten Kreisprozesses. Für jeden Schritt wird die verrichtete bzw. gewonnene Arbeit A bestimmt.

In einem Behälter mit Wasserdampf befindet sich ein Tröpfchen, das mit einer Spritze Wasser in Verbindung steht. Es herrscht Gleichgewicht. Der Druck im Dampfraum ist p_r und der in der Flüssigkeit aufgrund der Oberflächenspannung um $2\sigma/r$ größer.



1. Schritt

Nun wird dem Dampfraum 1 Mol entnommen

$$A_{Gas} = \int p dV = nRT$$

und gleichzeitig der Flüssigkeit 1 Mol zugeführt.

$$A_{Fl} = \left(p_r + \frac{2\sigma}{r}\right) LV_0$$

Zusammen:

$$A_1 = RT - \left(p_r + \frac{2\sigma}{r}\right) LV_0$$

2. Schritt

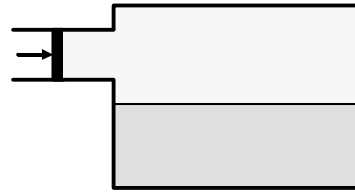


Der Dampf wird isother expandiert von

$$p_r \rightarrow p_\infty$$

$$A_2 = RT \ln \frac{p_r}{p_\infty}$$

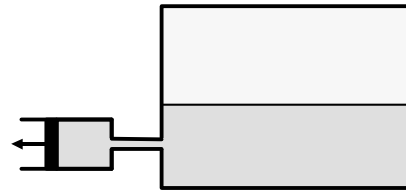
Nun wird ein Hilfsbehälter betrachtet, in dem sich gesättigter Dampf über einer ebenen Wasserfläche befindet.



3. Schritt

In den Gasraum wird 1 Mol gepreßt (stammt von Schritt 1)

$$A_3 = -RT$$



4. Schritt

Der Flüssigkeit wird 1 Mol entnommen (wird in Schritt 1 benötigt).

$$A_4 = LV_0 p_\infty$$

Zusammen ergibt dies:

$$RT - \left(p_r + \frac{2\sigma}{r}\right) LV_0 + RT \ln \left(\frac{p_r}{p_\infty}\right) - RT + LV_0 p_\infty = 0$$

$$RT \ln \left(\frac{p_r}{p_\infty}\right) = V_0 \left[\frac{2\sigma}{r} + (p_r - p_\infty)\right],$$

dabei kann man $p_r - p_\infty$ vernachlässigen.

$$\text{Mit } LV_0 = \frac{M}{\rho} \text{ und } R = kL \text{ gilt } \ln \left(\frac{p_r}{p_\infty}\right) = \frac{M}{\rho RT} \frac{2\sigma}{r}$$

oder in der bekannteren Form

$$p_r = p_\infty \cdot e^{\frac{M}{\rho RT} \frac{2\sigma}{r}}$$

Wie man durch Einsetzen leicht bestätigen kann, ist der Dampfdruck eines Tröpfchens mit Radius $r = 15 \times 10^{-10}$ m gerade etwa doppelt so groß wie der über einer ebenen Fläche.

Der betrachtete Radius mag sehr klein erscheinen, aber immerhin müssen sich fast 500 Wassermoleküle zusammenschließen, um einen solchen Tropfen zu bilden. Bestandteile von Tabakrauch weisen die gleiche Größe auf.

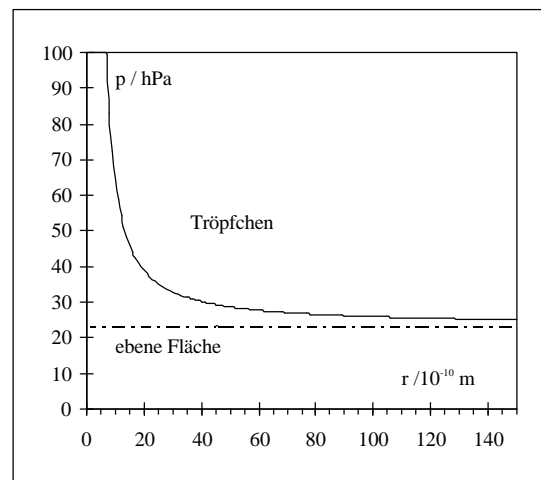


Abb. 4: Dargestellt ist der Dampfdruck in Abhängigkeit vom Radius. Gestrichelt ist der Dampfdruck über einer ebenen Fläche eingezeichnet (20 °C).

Interessant ist vielleicht noch folgende Übersicht über typische Tröpfchengrößen:

Tropfen durchmesser (mm)	Tropfenzahl/mg	Fallgeschwindigkeit (cm/s)	Typ
0,001	1 900 000 000	0,003	Wolken
0,005	15 000 000	0,07	Wolken
0,01	1 900 000	0,3	Wolken
0,05	15 000	9	Wolken
0,1	1 900	32	Wolken
0,5	15	200	Sprühregen
1	2	300	Regen
5	-	670	Regenschauer

Für kleine Tröpfchen (Kugelform, laminare Strömung) mit dem Radius r läßt sich die Sinkgeschwindigkeit (von Windbewegungen und Auftrieb wird abgesehen) leicht berechnen. Die Geschwindigkeit v wird gerade so groß, daß die Reibungskraft

F_R gemäß des Stokesschen Reibungsgesetzes $F_R = 6\pi\eta rv$ gleich dem Gewicht $G = \rho Vg$ des Tropfens ist.

Dabei ist η die dynamische Viskosität von Luft (1708×10^{-8} Pa·s, bei 0 °C), ρ die Dichte von Wasser ($1,0 \times 10^3$ kg/m³) und g die Fallbeschleunigung ($9,81$ m/s²).

Anhang

Bei der hier behandelten Thematik sind in der Physik und in der Meteorologie bei Formeln unterschiedliche Bezeichnungen üblich. Die folgende Übersicht erlaubt einen Vergleich.

Phys.	deutsch	Metor.	englisch
ϑ	Lufttemperatur in °C	TT	air temperature in degrees Celsius
ϑ_F	Feuchttemperatur in °C	HT	humid temperature
ϑ_d	Taupunkttemperatur in °C	DT	dew-point temperature
p	Luftdruck	P	pressure
p_D	aktueller Dampfdruck	VP	vapor pressure
p_S	Sättigungsdampfdruck	SVP	saturated vapor pressure
φ	relative Luftfeuchtigkeit	RH	relative humidity

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	100																													
2	93	100																												
3	87	93	100																											
4	81	87	93	100																										
5	75	81	87	93	100																									
6	70	75	81	87	93	100																								
7	66	70	76	81	87	93	100																							
8	61	66	71	76	81	87	93	100																						
9	57	61	66	71	76	81	87	93	100																					
10	53	57	62	66	71	76	82	87	93	100																				
11	50	54	58	62	66	71	76	82	87	94	100																			
12	47	50	54	58	62	67	71	76	82	88	94	100																		
13	44	47	51	54	58	62	67	72	77	82	88	94	100																	
14	41	44	47	51	55	58	63	67	72	77	82	88	94	100																
15	38	41	44	48	51	55	59	63	67	72	77	82	88	94	100															
16	36	39	42	45	48	51	55	59	63	68	72	77	82	88	94	100														
17	34	36	39	42	45	48	52	55	59	63	68	72	77	82	88	94	100													
18	32	34	37	39	42	45	49	52	56	59	64	68	73	77	83	88	94	100												
19	30	32	34	37	40	43	46	49	52	56	60	64	68	73	78	83	88	94	100											
20	28	30	32	35	37	40	43	46	49	52	56	60	64	68	73	78	83	88	94	100										
21	26	28	30	33	35	38	40	43	46	49	53	56	60	64	69	73	78	83	88	94	100									
22	25	27	29	31	33	35	38	41	43	46	50	53	57	60	64	69	73	78	83	88	94	100								
23	23	25	27	29	31	33	36	38	41	44	47	50	53	57	61	65	69	73	78	83	89	94	100							
24	22	24	25	27	29	31	34	36	38	41	44	47	50	54	57	61	65	69	74	78	83	89	94	100						
25	21	22	24	26	28	29	32	34	36	39	41	44	47	50	54	57	61	65	69	74	79	83	89	94	100					
26	20	21	23	24	26	28	30	32	34	37	39	42	45	48	51	54	58	61	65	70	74	79	84	89	94	100				
27	18	20	21	23	24	26	28	30	32	34	37	39	42	45	48	51	54	58	62	66	70	74	79	84	89	94	100			
28	17	19	20	21	23	25	26	28	30	32	35	37	40	42	45	48	51	55	58	62	66	70	74	79	84	89	94	100		
29	16	18	19	20	22	23	25	27	29	31	33	35	37	40	43	45	48	52	55	58	62	66	70	75	79	84	89	94	100	
30	15	17	18	19	21	22	24	25	27	29	31	33	35	38	40	43	46	49	52	55	59	62	66	70	75	79	84	89	94	100

relative Luftfeuchte in %
nach rechts: Taupunkttemperatur
nach unten: Lufttemperatur