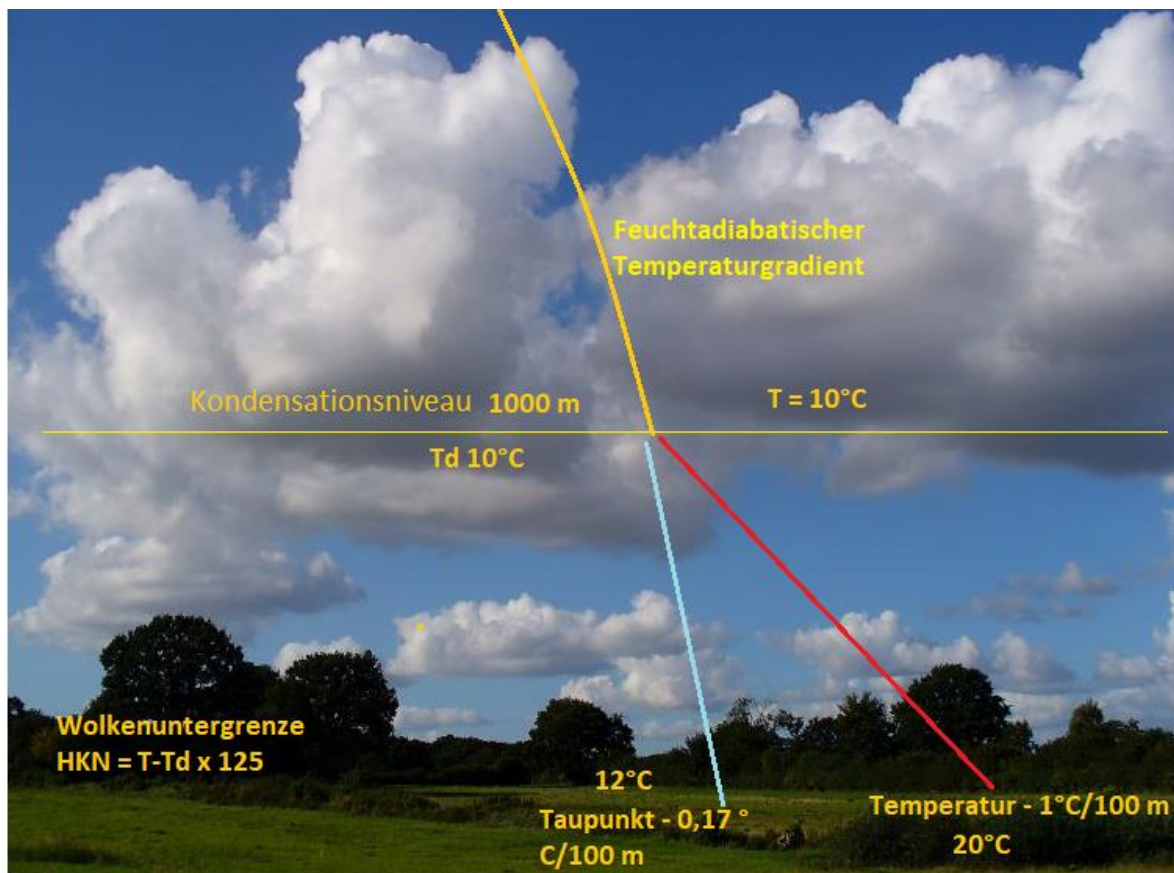


Bedeutung des Taupunktes und andere Feuchtemaße

Die Taupunkttemperatur oder der Taupunkt (im Winter Frostpunkt) stellt für die Meteorologie ein wichtiges Feuchtemaß dar und ist für die Wettervorhersage ein entscheidendes Kriterium. Der Definition nach ist der Taupunkt die Temperatur, bei der der Wasserdampfgehalt in der Luft dem maximal möglichen entspricht. Das Hygrometer würde dann bei Erreichen des Taupunktes 100% anzeigen. Der Taupunkt ist aber von der Umgebungstemperatur eine unabhängige Größe und kann nicht direkt gemessen werden. Im Gegensatz zu einem „normalen“ Haarhygrometer, dessen Anzeige immer nur relativ die Feuchte zur Temperatur anzeigt, kann man mit der Taupunkttemperatur das tatsächliche Wasserdampfvermögen in der Luft darstellen.

Wolkenbildung

Wolken beispielsweise bilden sich dann, wenn der Taupunkt erreicht ist oder sogar unterschritten wird bei einer Übersättigung. Ein Luftpaket steigt mit einer bestimmten Menge Wasserdampf adiabatisch nach oben und kühlt sich dabei ab, bis zu seinem Kondensationspunkt, dem Taupunkt. Während sich die umgebende Temperatur um $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ abkühlt, verringert sich der Taupunkt nur um $0,1$ bis $0,12^\circ\text{C}$ pro 100 Meter.



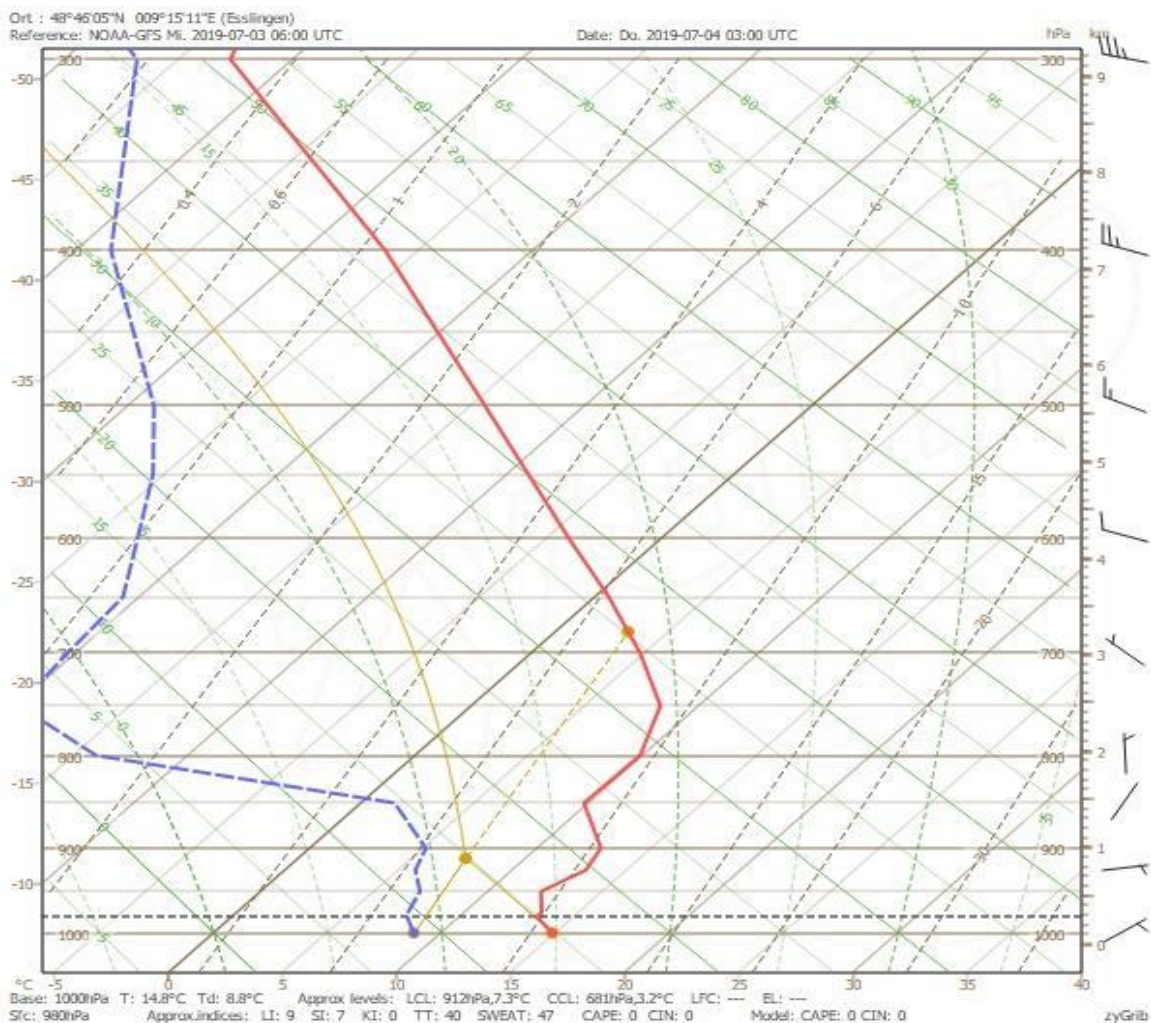
Der kondensierte Wasserdampf wird dann in Form von Wolken sichtbar, wenn das Kondensationsniveau erreicht ist. Es liegt umso höher, je trockener die Luft ist, also der Abstand zwischen Temperatur und Taupunkt (Spread). Eine niedrige

Wolkenbasis zeugt immer von einer hohen Luftfeuchte. Die Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt ist dann sehr klein. Bei Nebel sind beide Temperaturen gleich – ein Hygrometer sollte dann 100 % oder mehr anzeigen – oder liegen nur wenige Zehntel Grad auseinander. Deshalb macht ein Hygrometer ohne Temperaturanzeige keinen Sinn.

Eine einfache Faustformel für die Abschätzung der Wolkenuntergrenze:

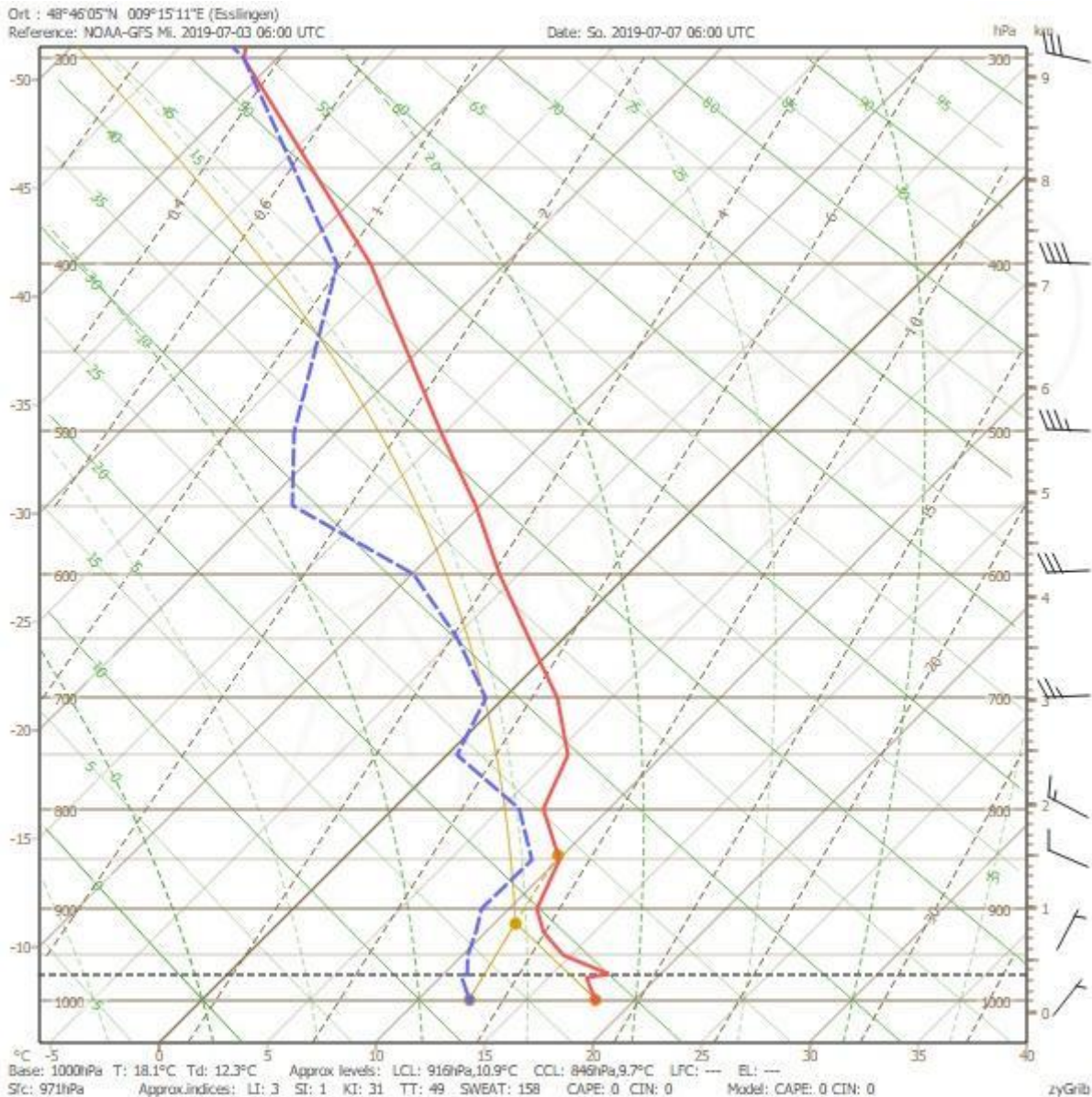
Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt mal 125 = Wolkenuntergrenze

Diese Faustformel gilt allerdings nur für Quellwolken nicht bei Schichtbewölkung



Vertikalprofil eines Radiosondenaufstieges: Rote Linie Temperatur, blaue gestrichelte Linie Taupunktkurve, gelbe Linie feuchtadiabatischer Aufstieg, die sehr weit links der Temperaturkurve liegt. Die Auslösetemperatur von Quellwolken wäre hier bei 40°C, die nicht erreicht werden.

Dieses Diagramm zeigt einen trockenen Tag ohne Wolkenbildung. Die Taupunktkurve driftet sogar ab einer Höhe von 2000 Metern sogar stark nach links ab, was auf sehr trockene Luft hindeutet. Das wäre ein Tag, um in den Bergen wandern zu gehen, da die Sicht 100 km und mehr betragen würde.



Grafiken: zyGrib

Bei diesem Diagramm liegen Temperatur und Taupunkt nah beieinander. Hier müsste man mit starker Wolkenbildung und auch Niederschlägen rechnen.

Abkühlung der Luft

Bei einem Rückgang der Temperatur am Abend, steigt proportional die relative Feuchte an und erreicht irgendwann die Temperatur, bei der sich auf Gräsern, Zweigen und auf Autos Tautropfen bilden (im Winter Reif). Dünne Körper kühlen dabei stärker ab, da bei ihnen die Oberfläche größer ist als im Vergleich zu ihrer Wärmekapazität, also die Fähigkeit Wärme zu speichern. Ihre Temperatur liegt dann meist deutlich unter der Lufttemperatur. Wird an dem Gegenstand der Taupunkt erreicht, obwohl die Feuchte der Umgebungsluft nur zwischen 80 und 90 % liegt, kann man schon kleine Tropfen erkennen, den Tau-Beschlag. Ein Beispiel hierfür ist die Karosserie des Autos.

Die Abkühlung der Luft nach Sonnenuntergang basiert auf der langwelligen Ausstrahlung über das Gesetz von Stefan-Boltzmann.

Die Konstante lautet demnach: $(5,670\,51 \pm 0,000\,19) \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$ multipliziert mit der 4. Potenz der Temperatur in Kelvin: $(5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$

$$\text{Bei } 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K}^4 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 = 417,88 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Bei } 10 \text{ }^\circ\text{C} = -363 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Bei } 5 \text{ }^\circ\text{C} = -338 \text{ W/m}^2$$

Da nun aber nicht die gesamte Strahlungsenergie von 417 W/m^2 vom Erdboden aus in den nächtlichen Himmel strahlt, muss die Rechnung modifiziert werden. Um die nächtliche negative Strahlungsbilanz zu erreichen, muss die atmosphärische Gegenstrahlung (AG) berücksichtigt werden. Bleiben wir bei dem Beispiel von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K) und einem Taupunkt von 5°C , dann wäre das ein Wasserdampfpartialdruck (Sättigungs-Dampfdruck) von $8,7 \text{ hPa}$.

$$\begin{aligned} \text{AG} &= \frac{5,67 \times 10^{-8} \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}^{-4}} \cdot 283 \text{ K}^4 \cdot (0,82 + (-0,25) \times 10^{-0,095 \cdot 8,7 \text{ hPa}}) \\ &= 284,6 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung ist somit $284,6 \text{ W/m}^2$, bei einem Taupunkt von 5°C und einem Dampfdruck von $8,7 \text{ hPa}$. Die oben angeführte Formel nach Angström ist eine von vielen Möglichkeiten, die atmosphärische Gegenstrahlung zu berechnen und gilt in diesem Beispiel ohne Bewölkung. Bei aufziehender Bewölkung in der Nacht gelten dann andere Beziehungen mit ähnlichen Parametern.

Die nächtliche Strahlungsbilanz ist somit

$$R_s = 363 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - 284,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = -79 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Bleibt es wolkenlos, dann kann näherungsweise die Taumenge berechnet werden. Dabei gehen wir von einer 12-stündigen negativen Strahlungsbilanz von -79 W/m^2 aus mit der latenten Wärmeenergie des Wasserdampfes von 2500 J/Kg

$$\frac{79 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{2500 \text{ J/kg}} \cdot 12 \text{ h} \sim 3,8 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = 3,8 \text{ mm}$$

Der Taupunkt verrät auch, inwieweit die Temperatur in der Nacht sinkt. Das hat wiederum mit dem Wasserdampfgehalt zu tun. So lässt sich mit dem Taupunkt in etwa die Tiefsttemperatur der Nacht vorhersagen. Wobei die tiefste Nachttemperatur (ohne Bewölkung) meist am nächsten Morgen zum Sonnenaufgang erreicht wird, was im Übrigen auch mit der langwelligen Ausstrahlung des Erdbodens zu tun hat. Die Temperatur sinkt so lange, bis die Strahlungsbilanz mit den ersten Sonnenstrahlen am Morgen ausgeglichen ist.

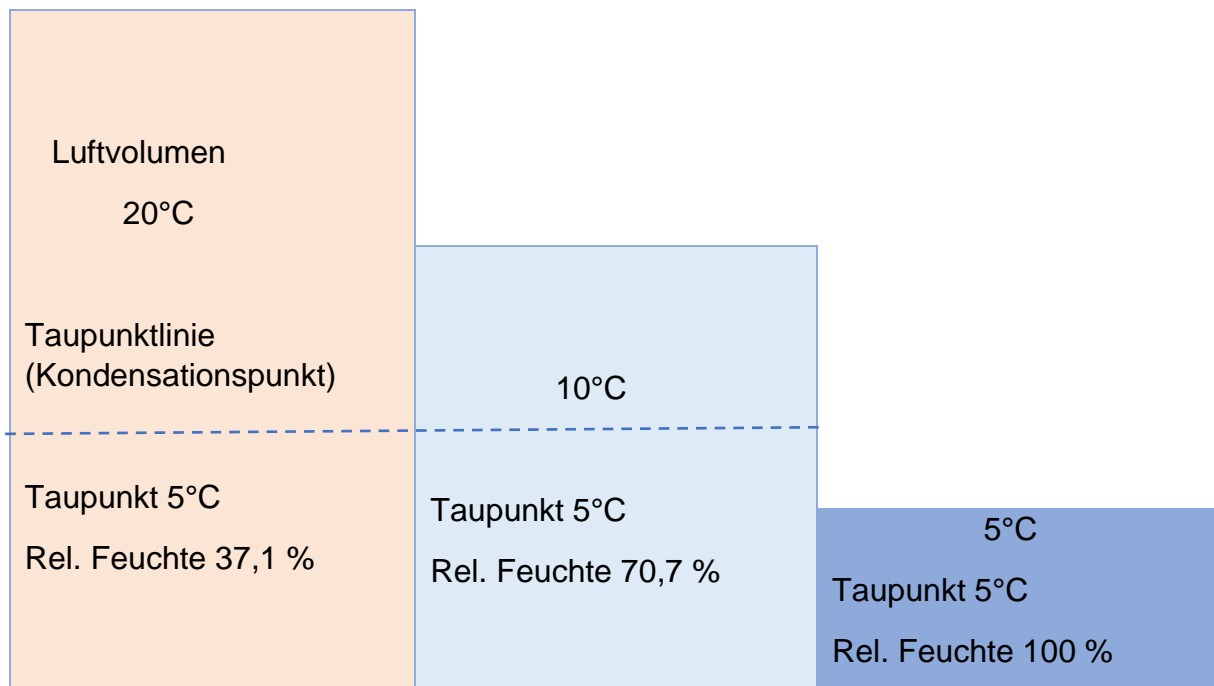
Und wer von Formeln noch nicht genug hat und die Tiefsttemperatur der Nacht bestimmen möchte, kann das mit dieser Gleichung anstellen:

- T_{min}* Temperatur-Minimum
T_{max} Temperatur [°C] zum Zeitpunkt des Maximums
T_d Taupunkt [°C] zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums
K Faktor für Bewölkung und Wind (siehe Tabelle)

$$T_{min} = 0,5 \cdot (T_{max} + T_d) - K$$

Wind während der Nacht kn	mittlere Bewölkung während der Nacht in Achtel				
	0	1-2	3-4	5-6	7-8
0	8.8	8.0	7.3	6.7	3.2
1-3	8.2	7.7	6.7	5.1	2.8
4-6	6.5	5.8	5.2	4.0	2.3
7-10	4.7	4.3	3.9	3.1	1.8
11-16	2.3	2.8	2.5	2.1	1.4
17-21	0.5	0.8	2.0	1.1	0.8

Die dargestellte Grafik zeigt die Abkühlung der Luft von 20°C auf 5°C. Der Taupunkt bleibt unverändert, solange es keine Änderung der Luftmasse gibt. Somit steigt zwar die relative Feuchte mit zunehmender Abkühlung an, aber ein echter Feuchteverlust oder Zuwachs ist mit einem konstanten Taupunkt nicht verbunden.



Über die Taupunkttemperatur lässt sich viel erfahren. Im Folgenden einige Regeln zum Taupunkt:

Anstieg des Taupunktes	Taupunkttemperatur sinkt
Wolkenbildung und evtl. aufkommende Niederschläge	Wolkenrückgang bis zur vollständigen Auflösung, auch Nebel
Verschlechterung der Sicht	Erhöhung der Sichtweite
Absinken der Wolkenbasis	Anstieg der Wolkenbasis
Ab einem Taupunkt von 16°C Schwüle empfinden	Nachtfrostgefahr bei einem Taupunkt tagsüber von 0°C
Nach Passage einer Warmfront	Nach Kaltfrontdurchgängen (Abhängig vom Kaltfront-Typ)

Bringt man eine Flasche aus dem Kühlschrank in eine Umgebung mit einem hohen Taupunkt von 20°C oder mehr, bilden sich innerhalb kürzester Zeit Wassertropfen; vom Beschlagen (Nebel) bis zum Abregnen (Wassertropfen perlen an der Flasche herunter). Wie schnell sich Wassertropfen bei Unterschreitung des Taupunktes vergrößern können, kann mit der folgenden Formel deutlich gemacht werden.

Radius des Tröpfchens [μm]

Anfangsradius [μm]

Relative Übersättigung [%]

$$r(t) = \sqrt{r^2 + 2 \cdot (s - 1) \cdot t}$$

Gehen wir von einem Tröpfchen von 2 μm aus und einer Übersättigung von 5% sowie einer Wachstumszeit von 30 Sekunden. Diese Wachstumsraten sind sowohl in einer Wolke als auch an Gegenständen möglich.

$$r(t) = \sqrt{2^2 + 2 \cdot 5\% \cdot 30\text{ s}} = 17,4\mu\text{m}$$

In etwa 30 Sekunden ist das kugelförmige Wassertröpfchen von anfangs 2 μm auf 17,4 μm angewachsen.

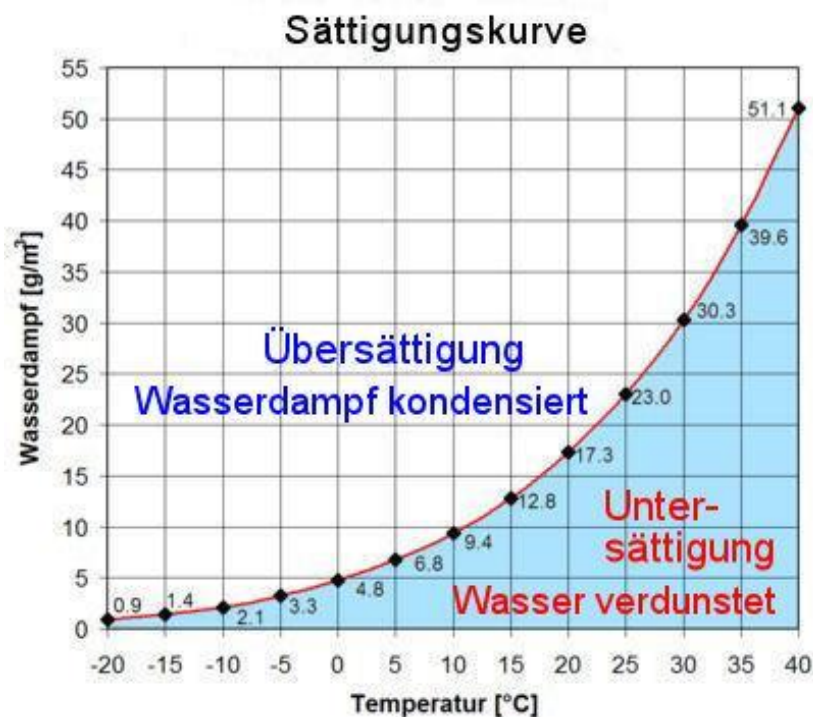
Dieselben physikalischen Prozesse der Kondensation finden auch bei der Bildung von Wolken statt.



Über den Taupunkt [td] lassen sich weitere Feuchtemaße berechnen, da sie miteinander verknüpft sind:

- Absolute Feuchte [a] (Dichte des Wasserdampfes) beinhaltet die tatsächlich vorhandene Feuchte in einem Volumen [g/m³]
- Spezifische Feuchte [s] (Wasserdampfgehalt) [g/kg Luft]
- Dampfdruck [e] Partialdruck des Wasserdampfes [hPa]
- Sättigungsdampfdruck [E] bei Erreichen des Taupunktes [td]

Die Luft kann abhängig von der jeweiligen Temperatur nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen und enthalten



Die Kurve zeigt die maximal mögliche Wasserdampfmenge in g/m³ (absolute Feuchte). Bei Überschreiten dieser Linie, was ein Unterschreiten des Taupunktes zur Folge haben muss, fällt der überschüssige Wasserdampf in Tropfenform aus. Entweder als schwebende Teilchen in der Luft, als Nebel oder als Tau. Im Übrigen ist Nebel nur die Bezeichnung der Sichtweite. Nebel ist eine am Boden aufliegende Wolke, da es sich um das Ein und dasselbe physikalische Phänomen handelt.

Die Tabelle zeigt die Beziehungen der Feuchteparameter bei Sättigung

Temp. [°C]	a [g/m ³]	s [g/kg]	E* [hpa]	Rel. Feuchte [%]
5	6,8	5,4	8,7	100
15	12,8	10,6	17,1	100
20	17,3	14,7	23,5	100
30	30,4	27,2	42,6	100

Absolute Feuchte

Gehen wir wieder zu unserem Beispiel mit dem Luftvolumen zurück und erinnern uns an den Taupunkt von 5°C. Zunächst müssen wir noch die absolute Feuchte berechnen, da wir ja wissen möchten, wie viel Wasserdampf bei einem Taupunkt von 5°C enthalten ist.

Die Formel lautet

Absolute Feuchte p_w [g/m³]

Spezifische Gaskonstante für Wasserdampf R_w [461,6 J/kg K]

Dampfdruck e [hpa]

Temperatur [K]

$$p_w = \frac{e}{(R_w \cdot T)}$$

$$p_w = \frac{8,7 \text{ hPa}}{\left(461,6 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 278 \text{ K}\right)} = 6,81 \text{ g/m}^3$$

Bei einem vorhandenen Taupunkt von 5°C sind also 6,7 g/m³ an Wasser in diesem Luftvolumen vorhanden. Da wir eine Ausgangstemperatur von 20°C haben, könnten in das Volumen noch 10,6 g/m³ bis zur Sättigung aufgenommen werden. Über die Differenz der beiden Werte gelangen wir wieder zur relativen Feuchte.

$$r.F. = \frac{p_w 6,8 \text{ g/m}^3}{p_w 17,3 \text{ g/m}^3} \cdot 100 = 38,7 \%$$

Spezifische Feuchte

Die spezifische Feuchte ist das Verhältnis der Masse Wasserdampf zur Masse feuchter Luft und kann näherungsweise über diese Faustformel erhalten werden, wenn der Dampfdruck bekannt ist:

$$s = 0,622 \cdot \frac{e}{p} = 5,4 \text{ g/kg}$$

Dampfdruck

Jeder Bestandteil des Gasgemisches in der Luft besitzt einen bestimmten Druck, der zum Gesamtdruck in der Atmosphäre beiträgt. Die einzelnen Komponenten der Partialdrücke ergeben den Gesamtdruck. So hat Sauerstoff auf Meereshöhe, bei einem Volumenanteil von 21,2 %, den Druck von 212,28 hPa. Kohlendioxid nur 0,39 hPa und Luft 1013,25 hPa.

Die Summe der Partialdrücke ist gleich dem Gesamtdruck des Gasgemisches (Gesetz von Dalton)

$$\sum_i^k P = p_1 + p_2 + \dots + p_k = p_{ges.}$$

Den Sättigungsdampfdruck der Luft erhalten wir über die Gleichung von Magnus (deutscher Physiker und Chemiker 1802-1870)

Dabei muss zwischen Wasser und Temperaturen unter 0°C unterschieden werden.

Für Wasser

$$E_w = 6,1 \text{ hPa} \times 10^{\frac{9,5t}{273,2}}$$

Für Eis

$$E_w = 6,1 \text{ hPa} \times 10^{\frac{9,5t}{265,5}}$$

Die Tabelle enthält den Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur.

Beispiel: Wir nehmen eine Temperatur von 24°C an, dann wäre der Sättigungsdampfdruck [E*] bei 29,8 hPa. Die Taupunkttemperatur beträgt 10°C.

Das wäre ein Dampfdruck von [e] 12,3 hPa. Die relative Feuchte wäre demnach

$$\frac{12,3}{29,8} \cdot 100 = 41,27 \%$$

	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
-30	0.51		0.46		0.42		0.38		0.35		0.31		0.28		0.26		0.23		0.21
-20	1.3		1.2		1.1		1.0		0.89		0.81		0.74		0.67		0.51		0.51
-10	2.9		2.6		2.4		2.3		2.1		1.9		1.8		1.6		1.5		1.4
-0	6.1		5.7		5.3		4.9		4.5		4		3.9		3.6		3.3		3.1
+0	6.1	6.3	6.6	6.8	7.1	7.3	7.6	7.8	8.1	8.4	8.7	9	9.4	9.7	10	10.3	10.7	11.1	11.5
+10	12.3	12.7	13.1	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17.1	17.6	18.2	18.8	19.4	20	20.7	21.3	22
+20	23.4	24.1	24.9	25.6	26.4	27.2	28.1	28.9	29.8	30.7	31.7	32.6	33.6	34.6	35.6	36.7	37.8	38.9	40
+30	42.4	43.6	44.9	46.2	47.5	48.9	50.3	51.7	53.4	54.7	56.2	57.8	59.4	61	62.7	64.4	66.2	66.5	66.9

So lässt sich mit Hilfe der Tabelle schnell die jeweilige Feuchte bestimmen.

Wenn der Dampfdruck bekannt ist, lässt sich auch der Taupunkt bestimmen.

$$Td = \frac{((234,67 \cdot \log_e 12,3 \text{ hPa} - 184,2))}{(8.233 - \log_e 12,3 \text{ hPa})} = 10^\circ\text{C}$$

Der Dampfdruck ist in der Regel außerhalb und innerhalb eines Gebäudes bei offenen Türen und Fenstern der gleiche.

Bei sehr kalter Außenluft trocknen Räume daher im Winter sehr schnell aus, da es innerhalb von Gebäuden umso trockener ist, je größer die Differenz zwischen Außen- und Raumtemperatur ist.

Wie stark sich das bemerkbar macht, kann man anhand eines einfachen Beispiels sehen

Greifen wir nochmals auf die Dampfdrucktabelle zurück und nehmen eine Raumtemperatur von 24°C an. Dies entspricht einem Sättigungsdampfdruck von 29,8 hPa. Die relative Feuchte soll 43 % betragen, was mit einem Dampfdruck von 12,8 hPa gleichzusetzen ist. Laut Tabelle hätten wir damit einen Taupunkt von 10,6°C. Der Wassergehalt beträgt 9,38 g/m³. Da der Raum eine Größe von 20 m³ aufweist, sind darin 186 g oder 0,18 kg an Wasser vorhanden. Würde sämtliches Wasser auskondensiert, wäre der Boden lediglich angefeuchtet mit einer Wasserhöhe von annähernd 0,02 mm/m². Die Außentemperatur soll -10°C betragen, bei einem Taupunkt von -15°C, bei einem Dampfdruck von 4 hPa und einem Wasserdampfgehalt von 1,5 g/m³.

Nun werden zum Lüften die Fenster geöffnet und es braucht nur eine kurze Zeit, um die Feuchte im Gebäude noch weiter zu senken.

Es werden nur wenige Minuten vergehen und das Hygrometer zeigt eine relative Feuchte von

$$\frac{1,5 \text{ hPa}}{12,8 \text{ hPa}} \cdot 100 = 11,7\%$$

Wir haben also einen Wasserverlust von 157,6 g, der den Räumlichkeiten wieder zugeführt werden muss.

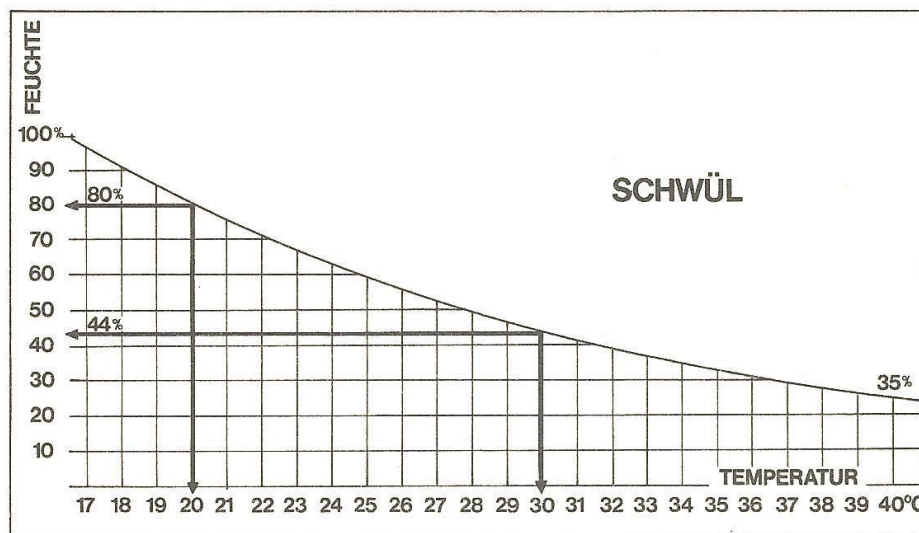
Selbst wenn die Raumtemperatur durch das Lüften wesentlich niedriger ist, steigt nicht gleichzeitig die Luftfeuchte, da der Wassergehalt nicht ansteigen kann.

Im Sommer sehen die Verhältnisse anders aus: Bei Taupunkten von 20°C (a 17,3 g/m³) und mehr, ist eher das Problem der hohen Luftfeuchte und der Schimmelbildung an Wänden. Näheres dazu sollte jedoch in einschlägiger Fachliteratur über die Bauphysik eingesehen werden.

Schwüle

In der Regel wird bei einem Taupunkt von 16 °C und bei einem Dampfdruck von 18,6 hPa die Luft allmählich als schwül empfunden. Allerdings empfindet nicht jeder Mensch die Temperatur und die Feuchteverhältnisse gleich. Das Kapitel Behaglichkeit und Empfinden wird in einem extra Beitrag behandelt.

Die Grafik zeigt in Abhängigkeit der jeweiligen rel. Feuchte und Temperatur die Grenze zur Unbehaglichkeit, was im Allgemeinen als schwül bezeichnet wird.



Literatur

Meteorologie Klose
Grundlagen der Grenzschicht Meteorologie Kraus
Forecasters' reference books met office.