

Schneesublimation

Unter gewissen Wetterbedingungen kann beobachtet werden, dass Schneereste auf einem Platz mit Hartbelag stetig kleiner werden und schliesslich ganz verschwinden, ohne dass darum herum Feuchtigkeitsspuren von Schmelzwasser sichtbar werden. Das bedeutet, dass der Schnee nicht schmilzt, sondern sublimiert. Die Bedingung dafür ist, dass die Feuchttemperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt.

Feuchttemperatur Gleichgewichtstemperatur, die sich infolge der Verdunstung an einer feuchten Oberfläche einstellt. Ist die Luft über der Oberfläche mit Wasserdampf gesättigt, so findet keine Verdunstung statt und die Feuchttemperatur entspricht der Lufttemperatur. Bei Untersättigung führt die Verdunstung zur Abkühlung (Verbrauch von Verdunstungswärme) und die Feuchttemperatur liegt unter der Lufttemperatur. [1]

Die Dichte eines Gases ist gegeben durch

$$\varrho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Mit der Gleichung der idealen Gase

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT, \quad (2)$$

wobei n = Molzahl, m = Masse und M = Molmasse, ergibt sich

$$\varrho = \frac{Mp}{RT}. \quad (3)$$

Für ein Gemisch idealer Gase mit den Komponenten i gilt

$$p_i V = p V_i \quad (4)$$

und

$$p_i V = \frac{m_i}{M_i} RT. \quad (5)$$

p_i ist der Partialdruck der Komponente i . Die Massenkonzentration oder Partialdichte der Komponente i ist definiert als:

$$\varrho_i = \frac{m_i}{V} = \frac{M_i p_i}{RT}. \quad (6)$$

Die Massenkonzentration des Wasserdampfs in feuchter Luft wird als *absolute Luftfeuchtigkeit* bezeichnet:

$$\varrho_W = \frac{m_W}{V} = \frac{M_W p_D}{RT}. \quad (7)$$

Die Dichte trockener Luft ist

$$\varrho_L = \frac{M_L p_L}{RT} = \frac{M_L (p - p_D)}{RT}, \quad (8)$$

und die Dichte feuchter Luft ist

$$\varrho = \frac{M_W p_D + M_L (p - p_D)}{RT}. \quad (9)$$

$M_L = 28.95$ g/mol ist die Molmasse von trockener Luft und $M_D = 18.02$ g/mol ist die Molmasse von Wasser. p_D ist der Partialdruck des Wasserdampfs.

Mit

$$\varepsilon = \frac{M_W}{M_L} = \frac{18.02}{28.95} = 0.622 \quad (10)$$

wird

$$\frac{\varrho_W}{\varrho} = \frac{M_W p_D}{M_W p_D + M_L (p - p_D)} = \frac{\varepsilon p_D}{(p - p_D) + \varepsilon p_D} \approx \frac{\varepsilon p_D}{p}. \quad (11)$$

Somit ist

$$\varrho_W = \frac{\varrho \varepsilon p_D}{p}. \quad (12)$$

Wenn die in der feuchten Luft enthaltene Masse des Wasserdampfs m_D auf die Sättigungsmenge m_s erhöht werden soll, muss die Wärmemenge

$$\lambda \Delta m = \lambda (m_s - m_D) \quad (13)$$

zugeführt werden. λ ist die spezifische Verdampfungswärme des Wassers. Die Wärmemenge pro Volumeneinheit ist:

$$\frac{\lambda \Delta m}{V} = \lambda \left(\frac{m_s}{V} - \frac{m_D}{V} \right) = \lambda (\varrho_s - \varrho_W) = \frac{\lambda \varrho \varepsilon}{p} (p_s - p_D). \quad (14)$$

Diese Wärme ergibt sich durch Abkühlung der Luft von der Lufttemperatur T auf die Feuchttemperatur T_F :

$$\frac{\lambda \varrho \varepsilon}{p} (p_s - p_D) = \varrho c_p (T - T_F). \quad (15)$$

c_p ist die spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) des Wassers.

Daraus folgt

$$p_s - p_D = \frac{c_p p}{\lambda \varepsilon} (T - T_F), \quad (16)$$

oder mit

$$\gamma = \frac{c_p p}{\lambda \varepsilon} \quad (17)$$

ergibt sich

$$p_D = p_s(T_F) - \gamma (T - T_F). \quad (18)$$

Der Sättigungsdruck p_s kann entwickelt werden:

$$p_s(T) = p_s(T_F) + \frac{\partial p_s}{\partial T} (T - T_F). \quad (19)$$

Mit der Abkürzung $\Delta = \partial p_s / \partial T$ wird

$$p_s(T_F) = p_s(T) - \Delta \cdot (T - T_F) \quad (20)$$

und

$$p_D = p_s(T) - (\gamma + \Delta)(T - T_F). \quad (21)$$

Auflösen nach $T - T_F$ liefert

$$T - T_F = \frac{p_s(T) - p_D}{\gamma + \Delta}. \quad (22)$$

Die relative Luftfeuchtigkeit ist definiert als

$$f = \frac{p_D}{p_s}. \quad (23)$$

Damit ergibt sich schliesslich

$$T_F = T - \frac{1 - f}{\gamma + \Delta} p_s(T). \quad (24)$$

Mit den Werten

$$c_p = 1.005 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (25)$$

$$p = 950 \text{ hPa} \quad (26)$$

$$\lambda = 2500 \text{ kJ kg}^{-1} \quad (27)$$

$$\varepsilon = 0.622 \quad (28)$$

wird

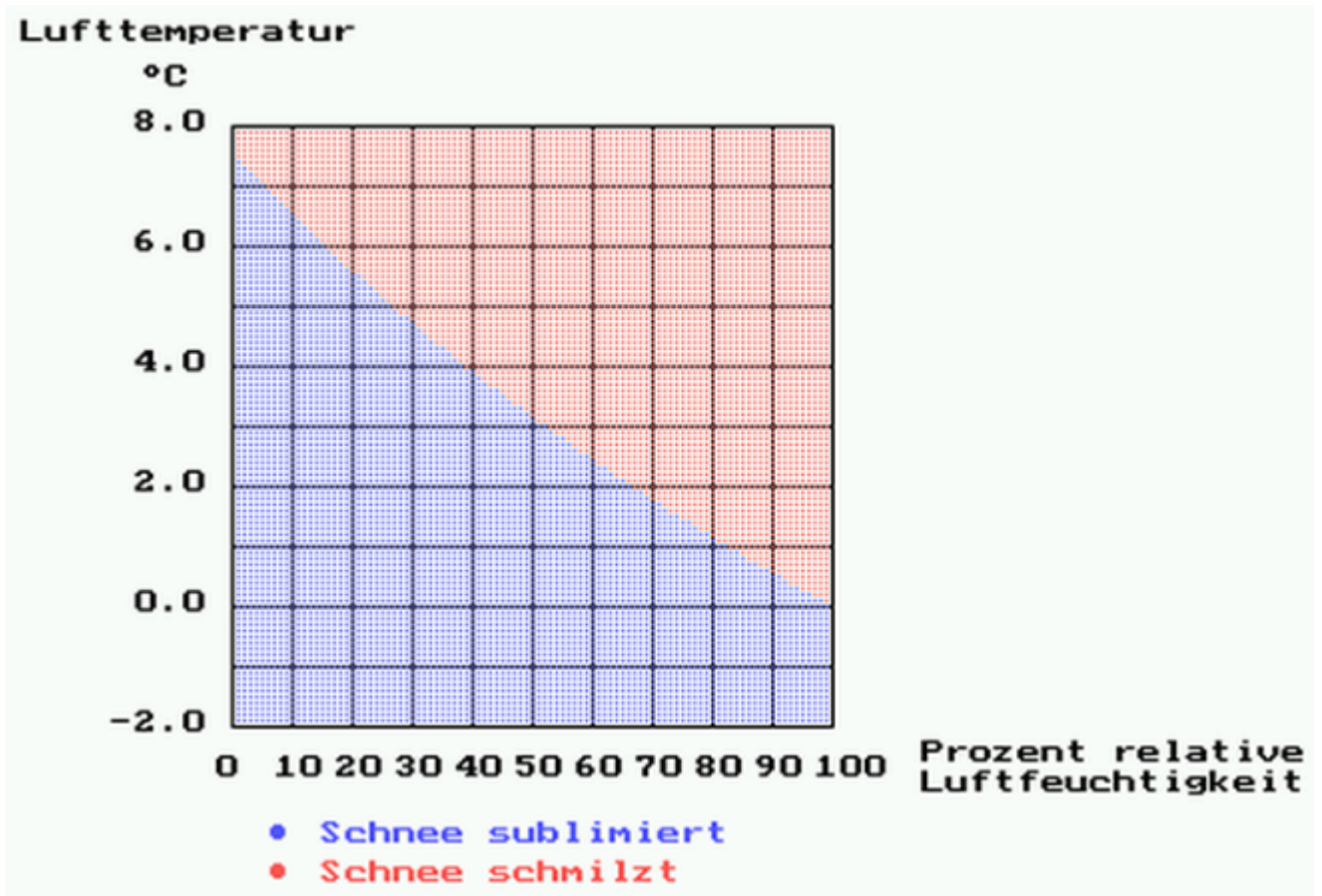
$$\gamma = 61.4 \text{ Pa K}^{-1}. \quad (29)$$

Für den Dampfdruck p_s als Funktion der Temperatur wurden die Formeln von Magnus verwendet. Der Sättigungsdampfdruck von Wasser über Eis ist gegeben durch die Beziehung [2]

$$p_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{22.46 \cdot t}{272.62 + t}\right). \quad (30)$$

t ist in Grad Celsius einzusetzen und p_s wird in hPa erhalten.

Die in Gleichung (15) ausgedrückte Energiebilanz ist vereinfacht und berücksichtigt nicht die Geschwindigkeiten der Verdunstung und des Wärmezufusses. Eine etwas genauere Rechnung ergibt einen leicht modifizierten Wert für γ [3].



Literatur

- [1] <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/feuchttemperatur/4785>
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4ttigungsdampfdruck>
- [3] John L. Monteith, Mike H. Unsworth, *Principles of Environmental Physics. Plants, Animals, and the Atmosphere*, Academic Press, Oxford 2013.
<https://www.researchgate.net/publication/2172122>