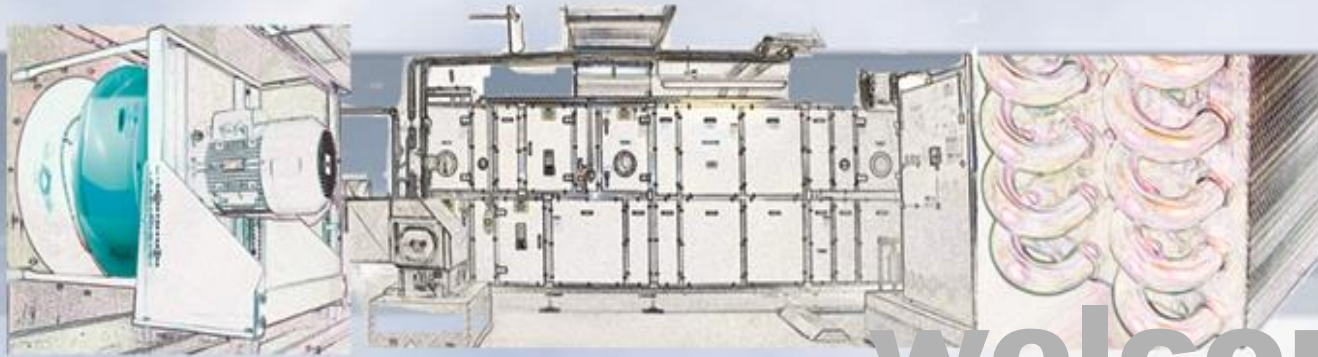


Willkommen



welcome

bienvenu

Raumlufttechnik hx-Diagramm

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Dipl.-Ing. **Christian Backes**
backes@howatherm.de

Prof. Dr.-Ing. **Christoph Kaup**
c.kaup@umwelt-campus.de



HOCHSCHULE TRIER
Umwelt-Campus Birkenfeld

Luft

Trockene Luft

Gemisch von Gasen:

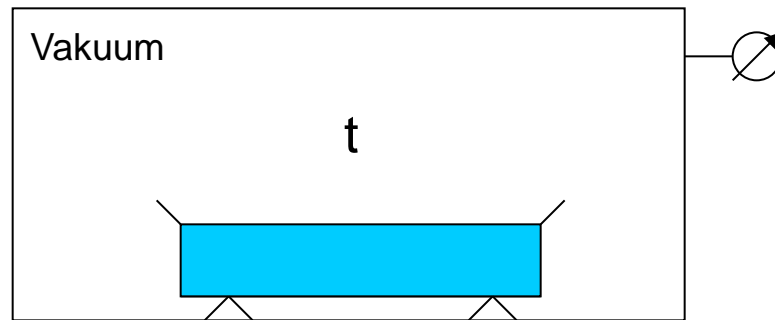
- Stickstoff N^2 ~ 78 %
- Sauerstoff O^2 ~ 21 %
- Edelgase ~ 1 %

Feuchte Luft

trockene Luft + Wasserdampf

Konzentrationsmaße

Wasserdampfdruck p_D'



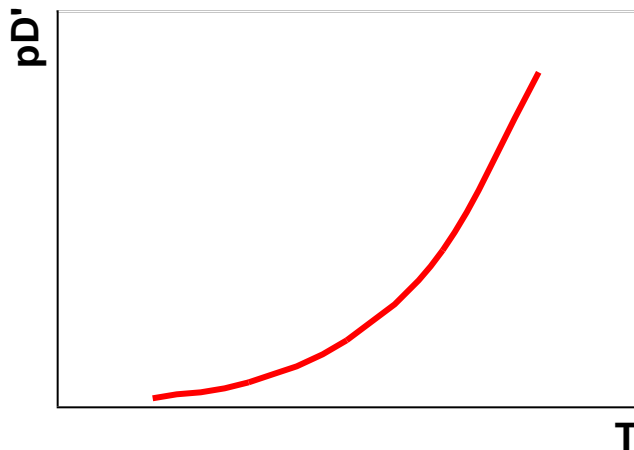
Druck des reinen Wasserdampfes auf seine Gefäßwandungen

Höchster Dampf-Druck, der sich bei einer bestimmten Temperatur einstellen kann.

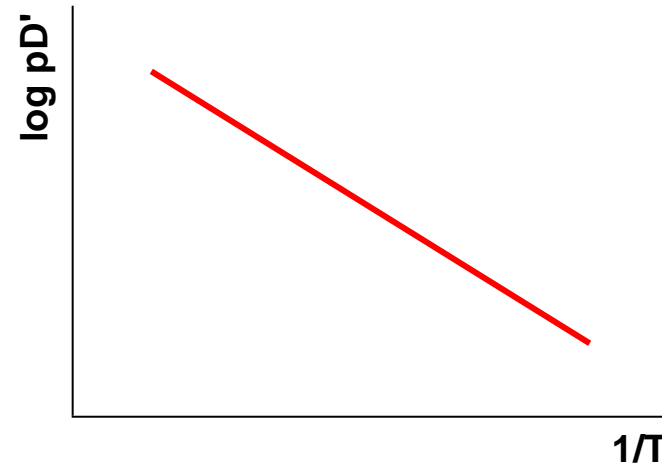
$$p_D' = f(T) \text{ (vgl. Dampftafel)}$$

Konzentrationsmaße

Wasserdampfdruck p_D'



Der Dampfdruck steigt exponentiell mit der Temperatur an.



Empirische Berechnung

$$p_D' = 10^{(9,333 - 2334,895 / T)} \text{ [mbar]}$$

Konzentrationsmaße

Die folgenden Gleichungen $p_{D,S} = f(t)$ sind aus Glück, Bernd: Zustands- und Stoffwerte, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2. Auflage, 1991 übernommen.

$$p_{D,S} = 611 \exp (- 4,909965 \cdot 10^{-4} + 0,08183197 t - 5,552967 \cdot 10^{-4} t^2 - 2,228376 \cdot 10^{-5} t^3 - 6,211808 \cdot 10^{-7} t^4) \quad [\text{Pa}]$$

(Geltungsbereich: $-20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

$$p_{D,S} = 611 \exp (- 1,91275 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} t - 2,939 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,841 \cdot 10^{-7} t^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} t^4) \quad [\text{Pa}]$$

(Geltungsbereich: $0,01 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 100 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

$$p_{D,S} = 611 \exp (6 \cdot 10^{-5} + 7,13274 \cdot 10^{-2} t - 2,581631 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,311955 \cdot 10^{-7} t^3 - 7,167112 \cdot 10^{-10} t^4) \quad [\text{Pa}]$$

(Geltungsbereich: $100 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

Konzentrationsmaße

Die Sättigungstemperatur $t_s = f(p_{D,S})$ berechnet sich dann umgedreht nach Glück aus:

$$t_s = -61,125785 + 8,1386 (\ln p_{D,S}) - 7,422003 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^2 + 6,283721 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^3 - 2,7237063 (\ln p_{D,S})^4 \quad [^\circ\text{C}]$$

(Geltungsbereich: $103 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 611,2 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,13%)

$$t_s = -63,16113 + 5,36859 (\ln p_{D,S}) + 0,973587 (\ln p_{D,S})^2 - 7,38636 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^3 + 4,81832 (\ln p_{D,S})^4 \quad [^\circ\text{C}]$$

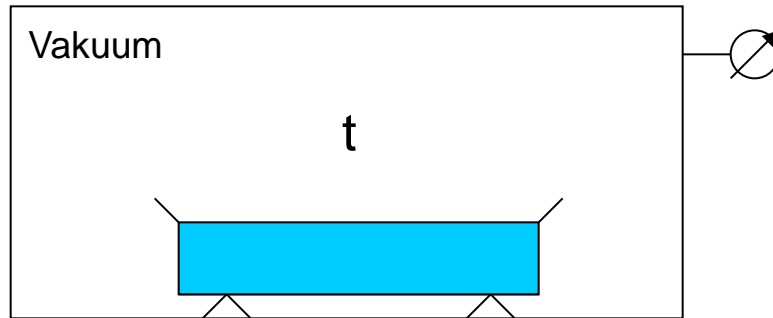
(Geltungsbereich: $611,2 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 101320 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,41%)

$$t_s = -228,146 + 31,97037 (\ln p_{D,S}) + 1,153295 (\ln p_{D,S})^2 - 0,27847109 (\ln p_{D,S})^3 + 1,319026 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^4 \quad [^\circ\text{C}]$$

(Geltungsbereich: $101320 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 1555100 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,05%)

Konzentrationsmaße

Wasserdampfdruck p_D'

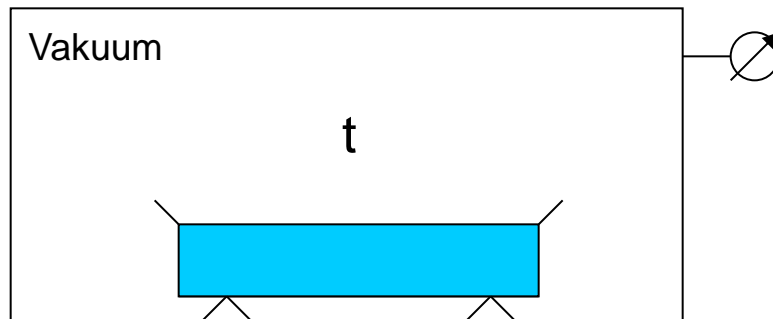


Bei der größtmöglichen Dampfmenge (Sättigung) ist der Wasserdampfdruck gleich dem Siededruck der entsprechenden Temperatur

Temperatur [°C]	Dampfdruck p_D' [bar]
20	0,02337
40	0,07375
60	0,19920
80	0,47360
100	1,01330

Konzentrationsmaße

Wasserdampfdruck p_D



Übung

Wie groß ist die max. mögliche Dampfmenge m_D bei $V = 30 \text{ m}^3$ und einer Raumtemperatur von 20 °C ?

Ideale Gasgleichung:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

$$m_D = p_D \cdot V / (R_D \cdot T)$$

Gas	Gaskonstante R [J / kg / K]
Wasser	461,40

Konzentrationsmaße

$$m_D = p_D \cdot V / (R_D \cdot T)$$
$$= 2.337 \cdot 30 / (461,4 \cdot 293,16)$$

$$= \frac{\text{N} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \cancel{\text{K}}}{\text{m}^2 \cdot \cancel{\text{J}} \cdot \cancel{\text{Nm}} \cdot \text{K}}$$
$$= \underline{0,518 \text{ kg}}$$

$$\rightarrow \rho = m / V = p / R \cdot t$$
$$= 0,518 / 30 \cdot 1.000$$
$$= 17,3 \text{ g}_D/\text{m}^3$$

Konzentrationsmaße

Dichte der trockenen Luft $\rho_{tr.L}$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

$$\rho = m / V = p / (R \cdot T) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Gas	Gaskonstante R [J / kg / K]
tr. Luft	287,10

- Dichte der trockenen Luft (Meereshöhe, 0 °C)

$$\rho_{tr.L} = 101.325 / (287,1 \cdot 273,15) = 1,292 \text{ kg/m}^3$$

- Dichte der trockenen Luft (Meereshöhe, 20 °C)

$$\rho_{tr.L} = 101.325 / (287,1 \cdot 293,15) = \underline{\underline{1,204}} \text{ kg/m}^3$$

Konzentrationsmaße

Dichte der feuchten Luft ρ_{fL}

$$\rho = m / V = p / (R \cdot T) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Übung (Meereshöhe, 20°C)

$$\rho_D = 101.325 / (461,4 \cdot 293,15) = 0,749 \text{ kg/m}^3$$

$$m_D = 0,518 \text{ kg}_D \quad (\text{aus Übung})$$

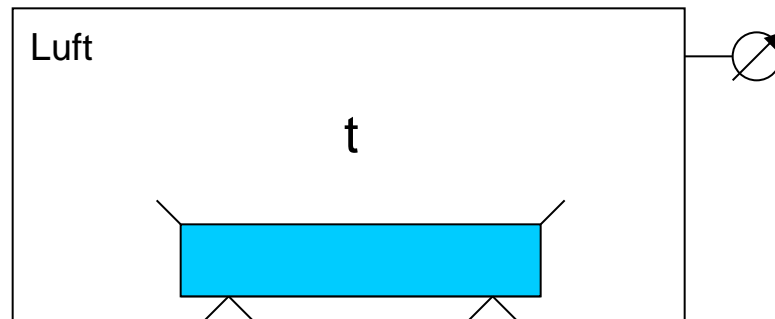
$$V_D = m_D / \rho_D = 0,518 / 0,749 = 0,691 \text{ m}^3 \quad (\text{aus Übung})$$

$$V_{\text{tr.L}} = 1 - 0,691 = 0,309 \text{ m}^3$$

$$\rho_{fL} = m_{\text{tr.L}} + m_D = 0,309 \cdot 1,204 + 0,691 \cdot 0,749 = \underline{\underline{0,8896}} \text{ kg/m}^3$$

Konzentrationsmaße

Partialdruck Wasserdampf p_D



wenn neben dem Wasserdampf auch noch Luft vorhanden ist

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{trockene Luft}} + p_D$$

(p_D von 0 bis p_D' , je nach relativer Feuchte)

Übung

Wie ist das Verhältnis des Partialdrucks des Wasserdampfes p_D' zum Luftdruck bei $t = 20^\circ\text{C}$?

Konzentrationsmaße

relative Luftfeuchte φ

$$\varphi = p_D / p_D' = \frac{\text{Partialdruck Wasserdampf}}{\text{Sättigungsdruck (Dampfdruck)}}$$

$$0 \leq \varphi \leq 1$$

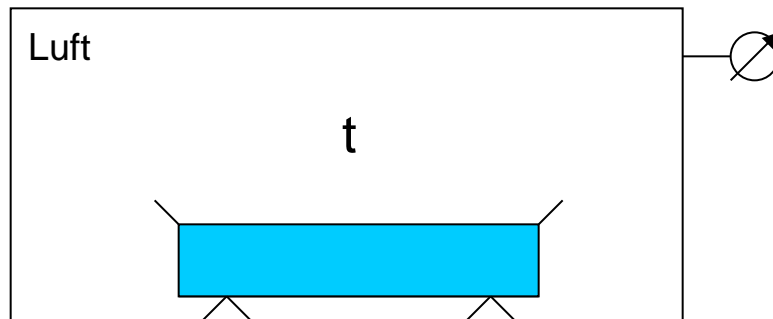
↙ ↘

trockene Luft Feuchte, gesättigte Luft

Beschreibt das prozentuale Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und dem maximal möglichen Wassergehalt der Luft (Sättigung).

Konzentrationsmaße

Partialdruck Wasserdampf p_D



wenn neben dem Wasserdampf auch noch Luft vorhanden ist.

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{trockene Luft}} + p_D$$

(p_D von 0 bis p_D' , je nach relativer Feuchte)

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{trockene Luft}} + \cancel{p_D} \cdot \varphi \cdot p_D'$$

Konzentrationsmaße

absoluter Feuchtegehalt x

$$m_{\text{feuchte Luft (fL)}} = m_{\text{trockene Luft (tr.L)}} + m_D$$

[/ $m_{\text{tr.L}}$] trockene Luft (Bezugsmasse, da sie unverändert bleibt)

$$m_{\text{fL}} / m_{\text{tr.L}} = 1 + m_D / m_{\text{tr.L}}$$

$$x = m_D / m_{\text{tr.L}}$$

Kennzeichnet den absoluten Feuchtegehalt der Luft.

$$m_{\text{fL}} = m_{\text{tr.L}} \cdot (1 + x)$$

Konzentrationsmaße

Zusammenhang zwischen x und φ

$$x = m_D / m_{\text{tr.L}} = \frac{\rho_D \cdot \cancel{V} \cdot R_{\text{tr.L}} \cdot \cancel{T}}{R_D \cdot \cancel{T} \cdot \rho_{\text{tr.L}} \cdot \cancel{V}} = \frac{R_{\text{tr.L}} \cdot \rho_D}{R_D \cdot \rho_{\text{tr.L}}}$$

$$= \frac{R_{\text{tr.L}} \cdot \cancel{\rho_D}}{R_D \cdot \cancel{\rho_{\text{tr.L}}}} \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_D'}{\rho_{\text{ges}} - \varphi \cdot \rho_D'}$$

$$\frac{287,10}{461,40} \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_D'}{\rho_{\text{ges}} - \varphi \cdot \rho_D'}$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_D'}{\rho_{\text{ges}} - \varphi \cdot \rho_D'}$$

Konzentrationsmaße

Enthalpie der feuchten Luft h

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t = \dot{m} \cdot \Delta h \quad [\text{kg/s} \cdot \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot \text{K} = \text{kJ/s} = \text{kW}]$$

$$\dot{Q}_{\text{feuchte Luft (fL)}} = \dot{Q}_{\text{trockene Luft (tr.L)}} + \dot{Q}_D$$

Bezug = 0°C H₂O verdampft bei 0°C = t₁
Dampf ist von t₁ auf t₂ erhitzt

$$\dot{Q}_{\text{fL(1-2)}} = \dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot c_{\text{ptr.L}} \cdot (t_2 - t_1) + r_D \cdot \dot{m}_D + \dot{m}_D \cdot c_{\text{pD}} \cdot (t_2 - t_1) \quad [/\dot{m}_{\text{tr.L}}]$$

$$\frac{(H_2 - H_1)_{\text{fL}}}{\dot{m}_{\text{tr.L}}} = c_{\text{ptr.L}} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_{\text{tr.L}}} \cdot [r_D + c_{\text{pD}} \cdot (t_2 - t_1)]$$

Konzentrationsmaße

Enthalpie der feuchten Luft h

$$\frac{(H_2 - H_1)_{fL}}{\dot{m}_{tr.L}} = c_{ptr.L} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_{tr.L}} \cdot [r_D + c_{pD} \cdot (t_2 - t_1)]$$

Bezug = 1 kg trockene Luft

$$(h_2 - h_1)_{fL} = c_{ptr.L} \cdot (t_2 - t_1) + x \cdot [r_D + c_{pD} \cdot (t_2 - t_1)]$$

Bezug = Tripelpunkt der Wassers mit t_1 und $h_1 = 0$

$$h_{2fL} = c_{ptr.L} \cdot t_2 + x \cdot (r_{D(0^\circ C)} + c_{pD} \cdot t_2)$$

$$h_{fL} = c_{ptr.L} \cdot t_2 + x \cdot (r_{D(0^\circ C)} + c_{pD} \cdot t_2)$$

Konzentrationsmaße

Enthalpie der feuchten Luft h

$$h_{fL} = c_{p\text{tr.L}} \cdot t + x \cdot (r_{D(0^\circ\text{C})} + c_{pD} \cdot t_2)$$

mit: $c_{p\text{ Luft}} = 1.006 \text{ kJ/kg/K}$

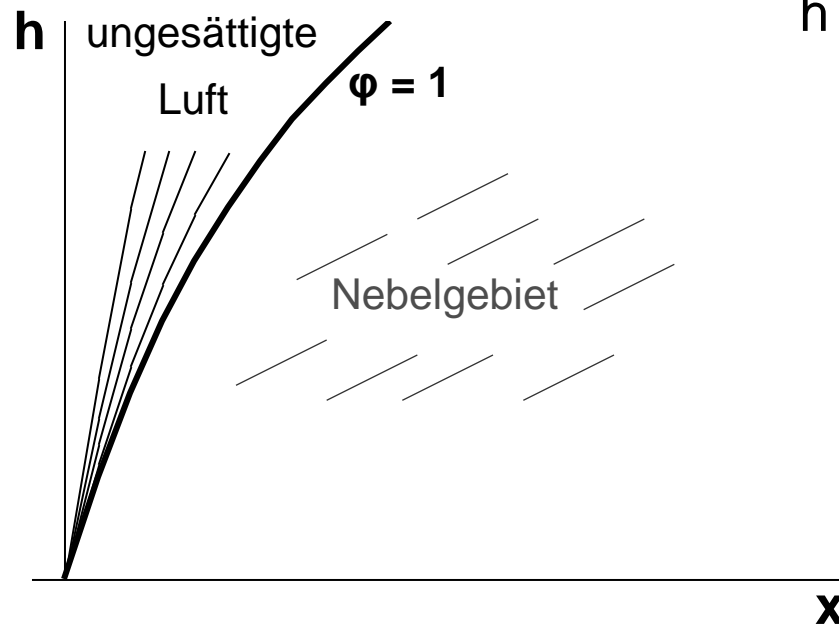
$$c_{p\text{ Dampf}} = 1,86 \text{ kJ/kg/K}$$

$$r_{D(0^\circ\text{C})} = 2.502 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fL} = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$

h-x Diagramm

Relative Feuchte



$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_D'}{p_{\text{ges}} - \varphi \cdot p_D'}$$

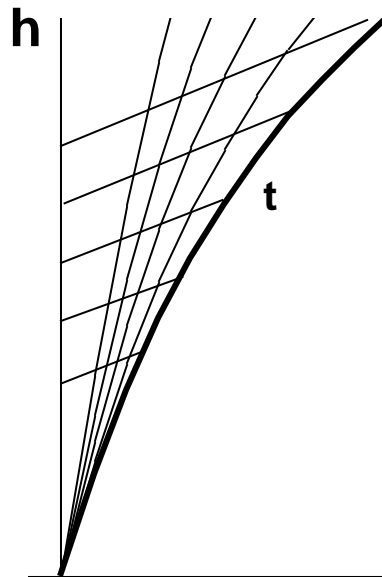
$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$

h-x Diagramm

Temperatur :

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_D'}{\rho_{\text{ges}} - \varphi \cdot \rho_D'}$$

$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$



Steigung der Isothermen:

$$x = 0 \rightarrow h = 1,006 \cdot t$$

$$x \neq 0 \rightarrow h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{t = \text{konst.}} = 1,86 \cdot t + 2.502$$

$$= c_{pD} \cdot t + r_D = \underline{h_D}$$

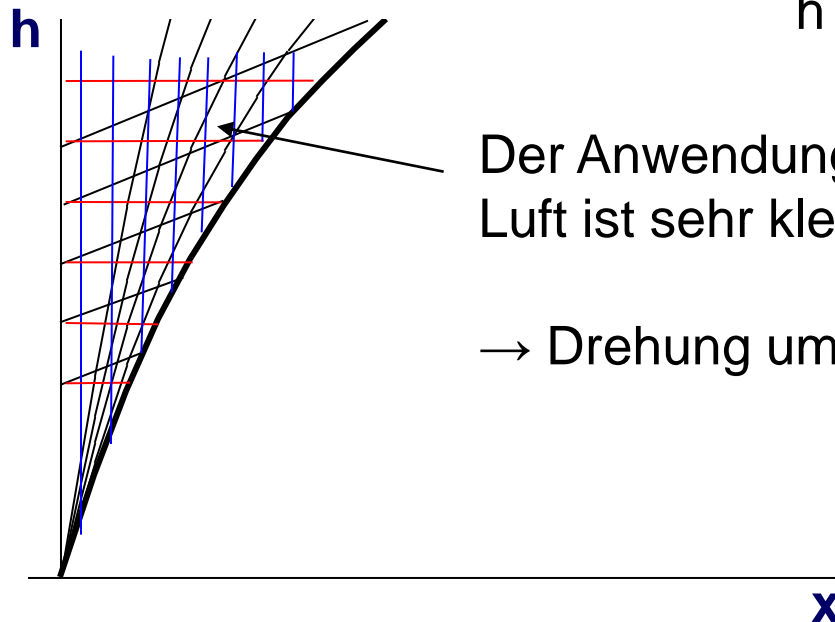
x

h-x Diagramm

absolute Feuchte,
Enthalpie:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_D'}{\rho_{\text{ges}} - \varphi \cdot \rho_D'}$$

$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$



Der Anwendungsbereich der gesättigten
Luft ist sehr klein:

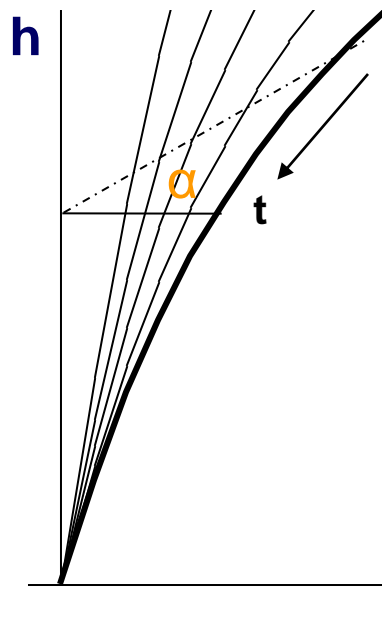
→ Drehung um Winkel $\alpha = r_D = 2.502 \text{ kJ/kg}$

h-x Diagramm

nach Richard Mollier (1923)

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_D'}{p_{\text{ges}} - \varphi \cdot p_D'}$$

$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$



Steigung der Isothermen

(Drehung um $\alpha = r_D$):

$$x \neq 0 \rightarrow h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$

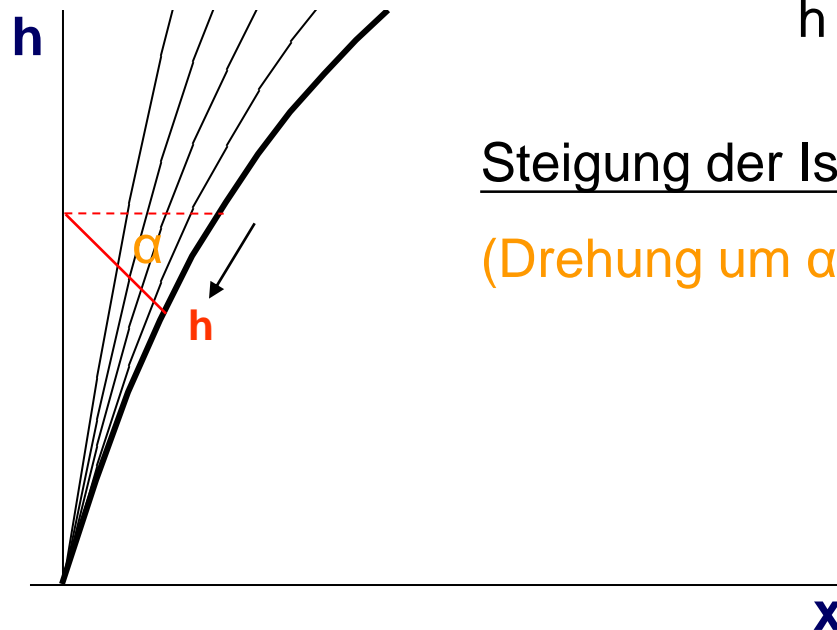
$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{t = \text{konst.}} = \underline{1,86 \cdot t + 2.502}$$

(~waagerecht)

x

h-x Diagramm

nach Mollier



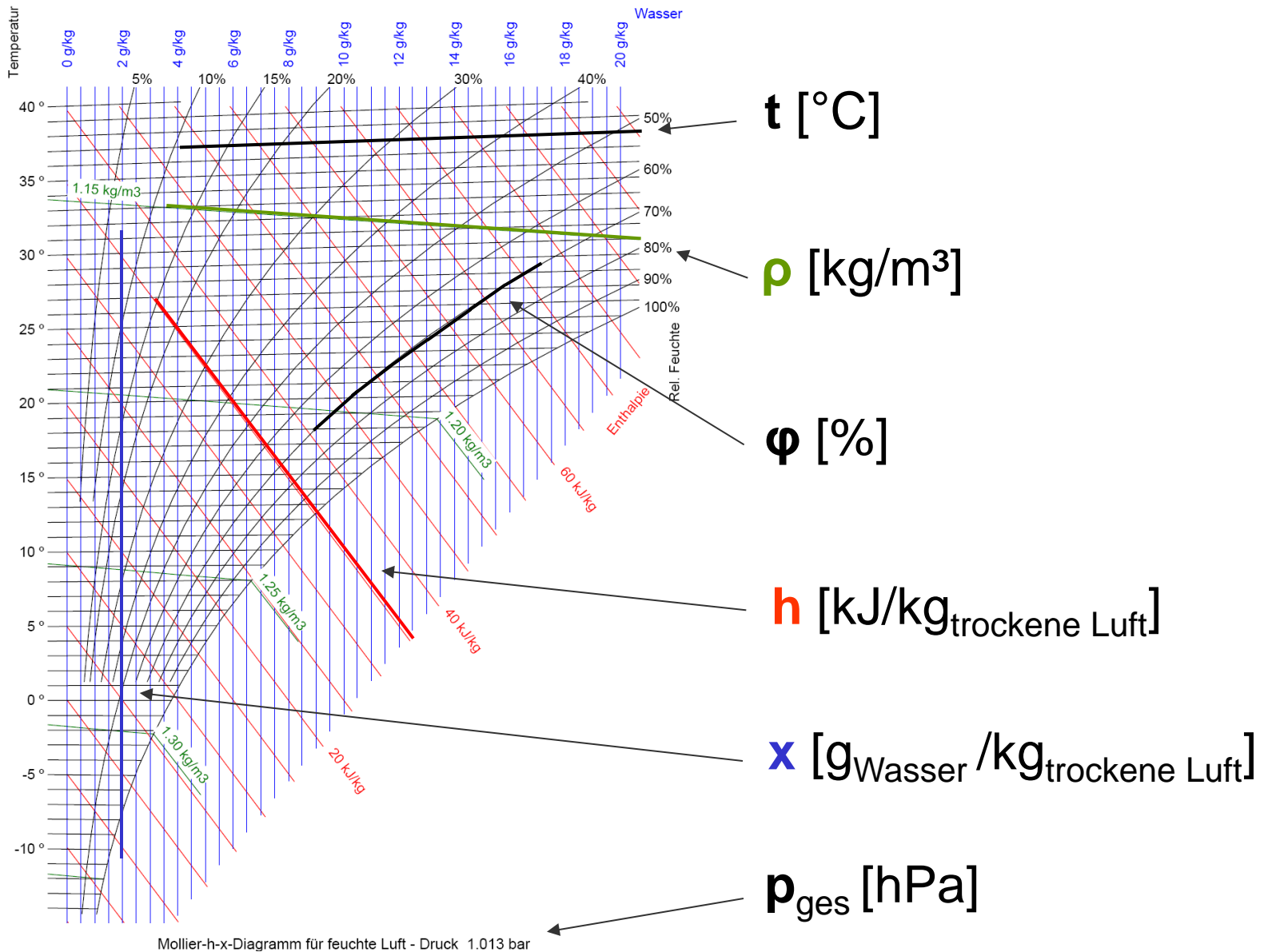
$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_D'}{p_{\text{ges}} - \varphi \cdot p_D'}$$

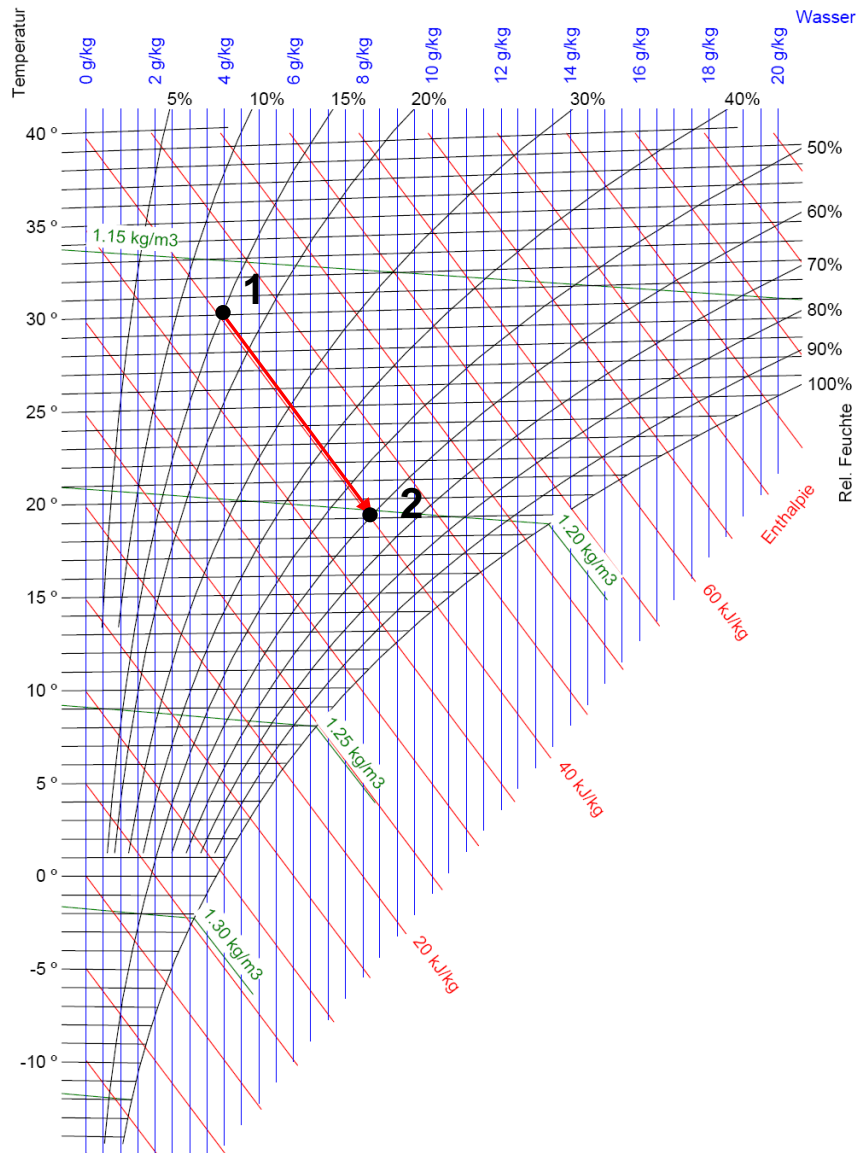
$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2.502)$$

Steigung der Isenthalpen

(Drehung um $\alpha = r_D$):

h-x Diagramm

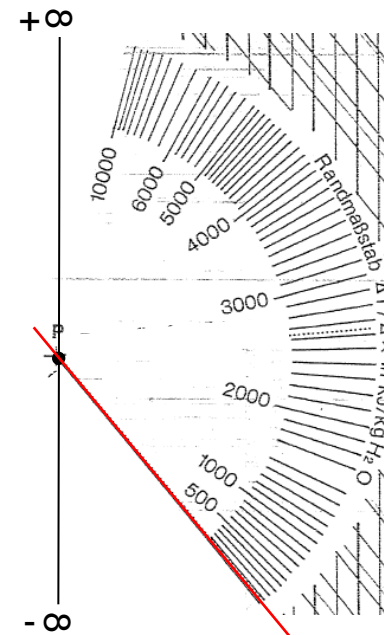




Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Randmaßstab $\Delta h / \Delta x$

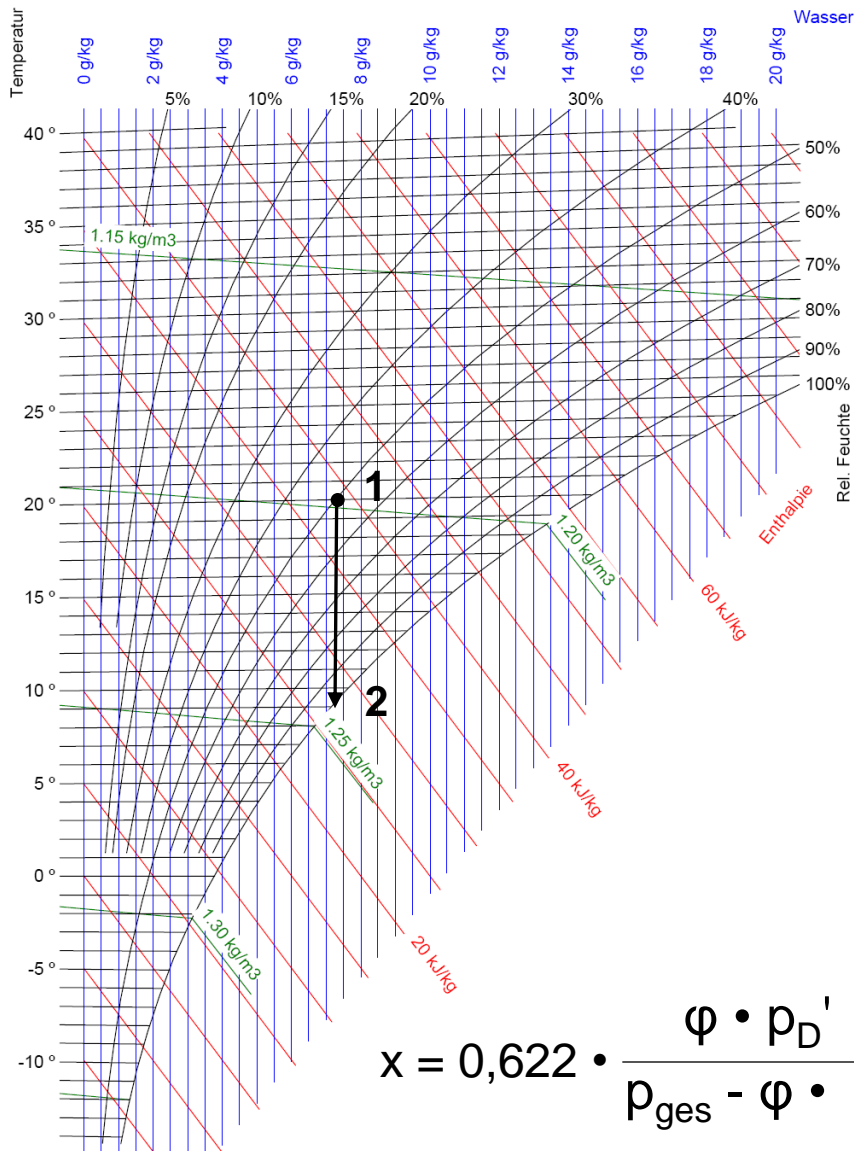
beschreibt die Richtung einer Zustandsänderung im h-x Diagramm.



Beispiel:

$$\Delta h / \Delta x = 0$$

h = konstant
Isenthalpe
Zustands-
änderung von
1 → 2

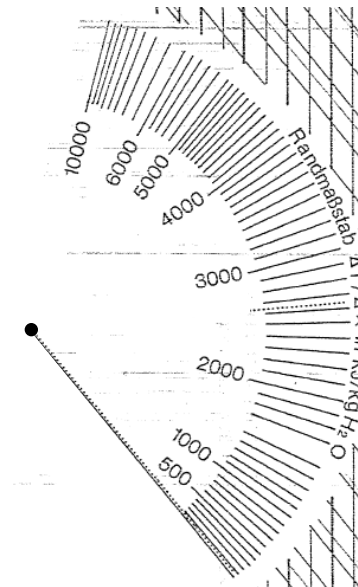


Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_D'}{p_{ges} - \varphi \cdot p_D'}$$

Taupunkt

beschreibt den Zustand gesättigter Luft ($\varphi = 100\%$)



Beispiel:

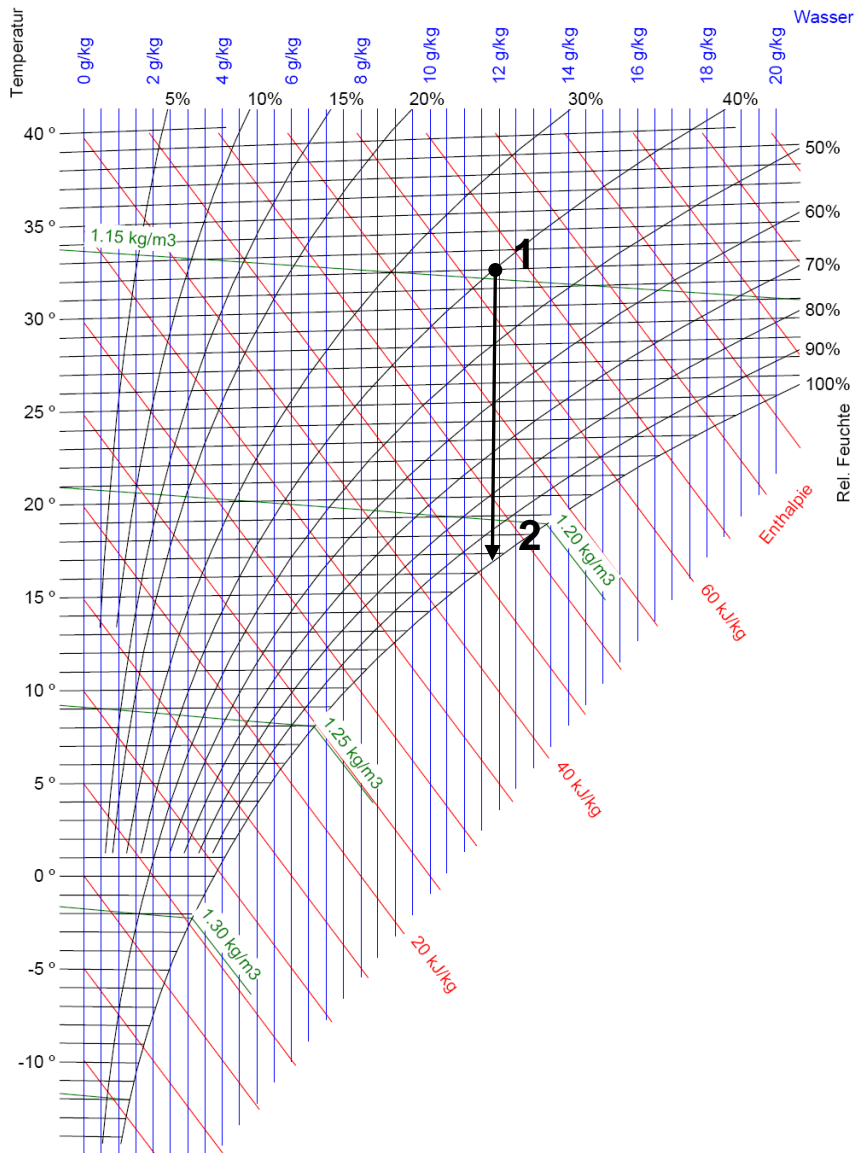
Luft₁ $t = 20\text{ °C}$ /
 $\varphi = 50\%$ kühlt
auf Taupunkt-
temperatur ab.

$$\Delta x = 0$$

$$\Delta h / \Delta x = \infty$$

$$x_1 = 7,25\text{ g/kg}$$

$$t_2 = 9,3\text{ °C}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Taupunkt

beschreibt den Zustand gesättigter Luft ($\varphi = 100\%$)

Übung:

10.000 m³/h Luft kühlen von $t = 32\text{ °C} / \varphi = 40\%$ (Normsommer; $b_o = 1.013\text{ mbar}$) auf Taupunkttemperatur ab. Berechnung der erforderlichen Kühlleistung Q_K ?

Lösung:

$$1) \quad p_{D'}(32^{\circ}\text{C}) = 10^{(9,333 - 2334,895 / T)} = 48,01 \text{ mbar}$$

$$2) \quad x_{(32^{\circ}\text{C})} = 0,622 \cdot (0,4 \cdot 48,01 / (1.013 - 0,4 \cdot 48,01)) = 12,02 \text{ g/kg}$$

$$3) \quad x / 0,622 = p_{D'} \cdot (1.013 - p_{D'})$$

$$p_{D' \text{ Taup.}} = 1.013 / (0,622 / x + 1) = 19,17 \text{ mbar}$$

$$4) \quad p_{D'} = 10 \cdot (9,333 - 2.334,895 / T)$$

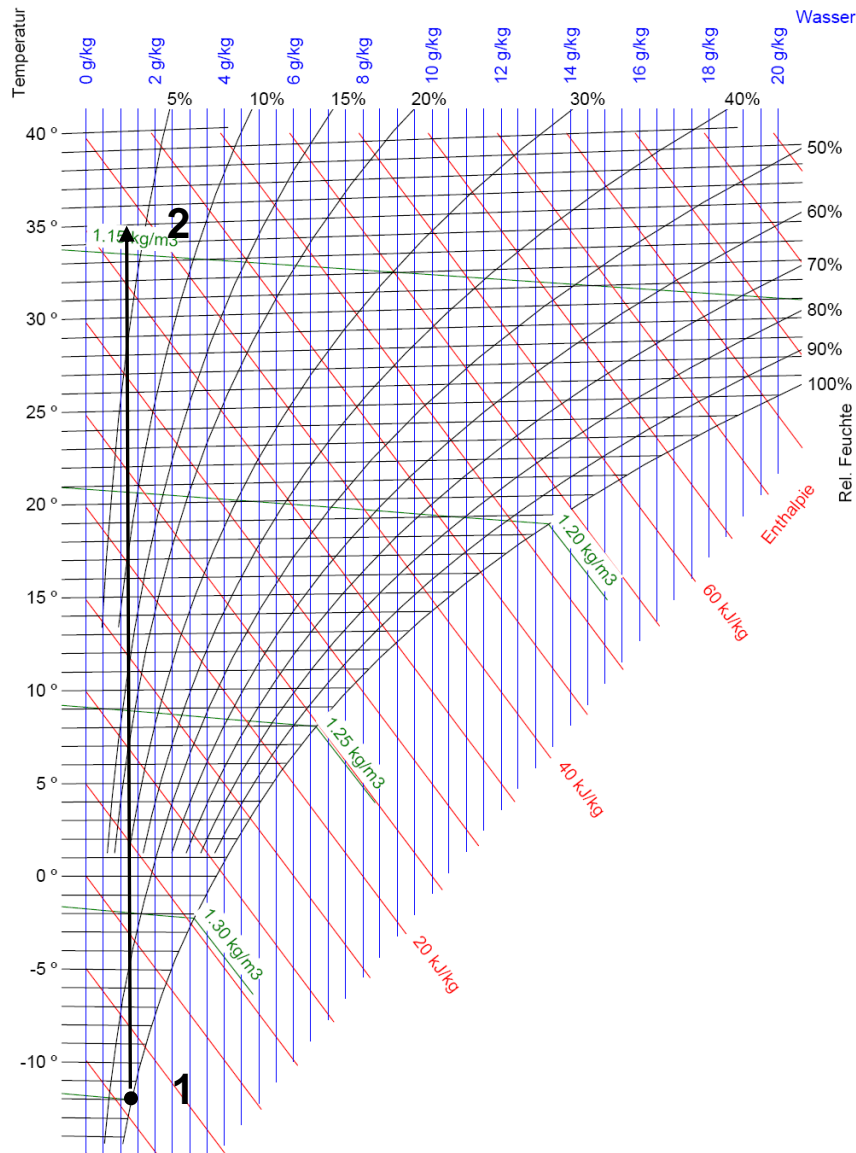
$$\log(19,17) = 9,333 - (2.334,895 / T) \rightarrow t_2 = 16,89 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$5) \quad \rho_1 \sim p / (R \cdot T_1) = 101.300 / (287,2 \cdot 305,15) = 1,156 \text{ kg/m}^3$$

$$6) \quad h_1 = 1,006 \cdot 32 + 12 / 1.000 \cdot (1,86 \cdot 32 + 2.502) = 62,9 \text{ kJ/kg}$$

$$7) \quad h_2 = 1,006 \cdot 16,9 + 12 / 1.000 \cdot (1,86 \cdot 16,9 + 2.502) = 47,4 \text{ kJ/kg}$$

$$8) \quad \dot{Q}_K = \dot{m} \cdot \Delta h = 10.000 / 3.600 \cdot 1,156 \cdot (62,9 - 47,4) = \underline{49,8 \text{ kW}}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Erwärmung bei $x = \text{konstant}$

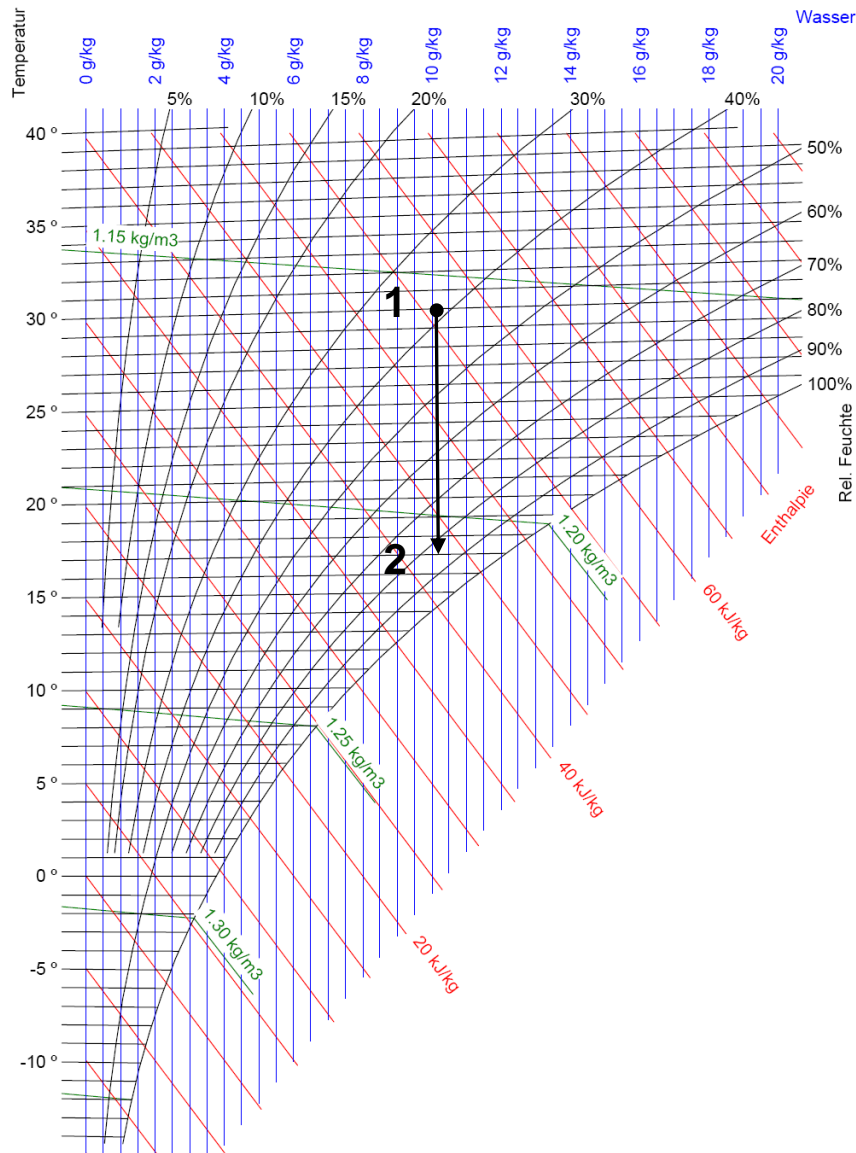
„ Erhitzer “

Beispiel:

Erwärmung von $t_1 = -12 \text{ °C} / 100 \%$
(Normwinter Hermeskeil)
auf $t_2 = 35 \text{ °C}$

$$\dot{Q}_{1/2} = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}_{\text{tr.L}}$$

$$\dot{Q}_{1/2} = (t_2 - t_1) \cdot \dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot c_{\text{ptr.L}}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Kühlung bei $x = \text{konstant}$

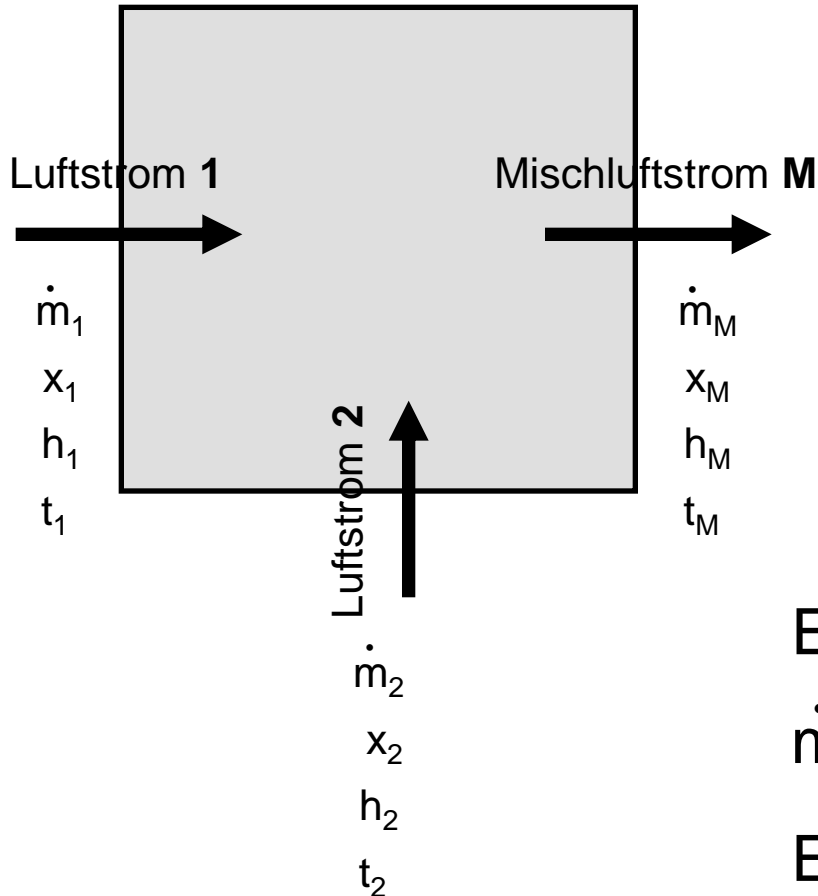
„trockener Kühler“

Beispiel:

Kühlung von $t_1 = 30 \text{ °C}$ / $x = 10 \text{ g/kg}$
auf $t_2 = 17 \text{ °C}$

$$\dot{Q}_{1/2} = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}_{\text{tr.L}}$$

$$\dot{Q}_{1/2} = (t_2 - t_1) \cdot \dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot c_{\text{ptr.L}}$$



Mischung zweier Luftströme

„Mischkammer“

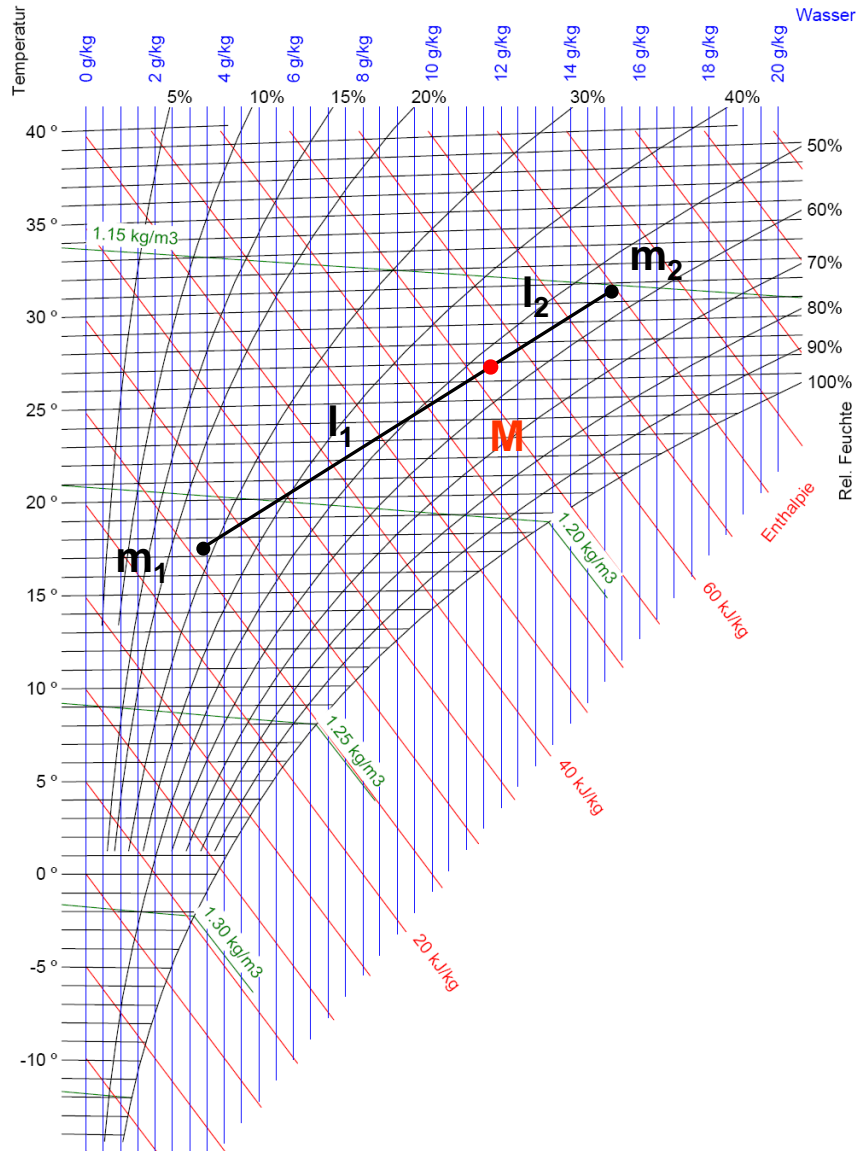
(mischt 2 Teilluftströme (1 & 2) zu einem gemeinsamen Luftstrom M)

Erhaltungssatz für Energie:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_M \cdot h_M$$

Erhaltungssatz für Wasser:

$$\dot{m}_1 \cdot x_1 + \dot{m}_2 \cdot x_2 = \dot{m}_M \cdot x_M$$

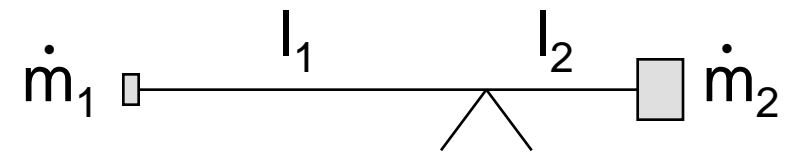


Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

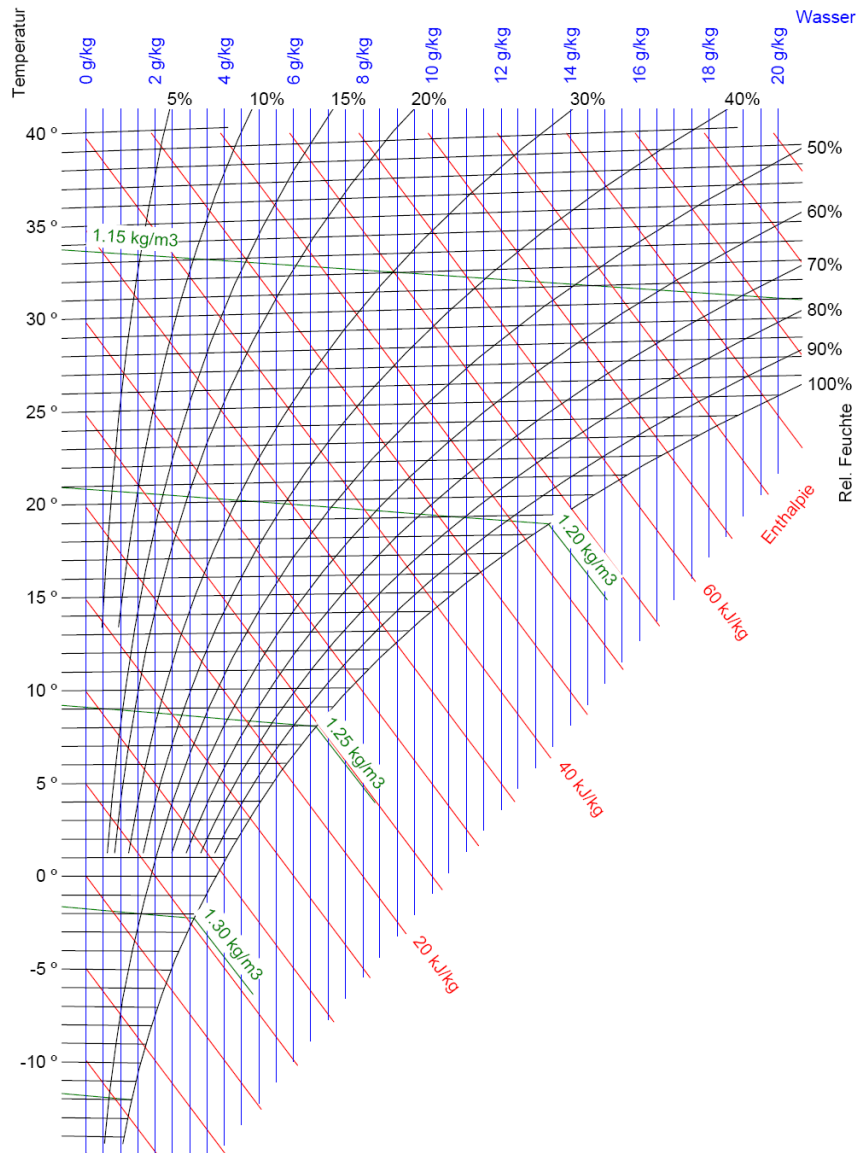
Mischung zweier Luftströme

„Mischkammer“

Hebelgesetz der Mischkammer:



$$\dot{m}_1 \cdot l_1 = \dot{m}_2 \cdot l_2$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Mischung zweier Luftströme

„ Mischkammer “

Übung:

- Luftmassenstrom (1) = 5.000 kg/h
 $t_1 = 20 \text{ °C} / 30 \%$
- Luftmassenstrom (2) = 2.500 kg/h
 $t_2 = 30 \text{ °C} / 60 \%$

gesucht: h_M , x_M , t_M

Lösung:

$$1) \quad p_{D'}(20^{\circ}\text{C}) = 10^{(9,333 - 2334,895 / T)} = 23,34 \text{ mbar}$$

$$2) \quad x_{(20^{\circ}\text{C})} = 0,622 \cdot (0,3 \cdot 23,34 / (1.013 - 0,3 \cdot 23,34)) = 4,33 \text{ g/kg}$$

$$3) \quad h_{(20^{\circ}\text{C})} = 1,006 \cdot 20 + 4,33 / 1.000 \cdot (1,86 \cdot 20 + 2.502) = 31,15 \text{ kJ/kg}$$

$$4) \quad x_{(30^{\circ}\text{C})} = \dots\dots\dots 15,99 \text{ g/kg}$$

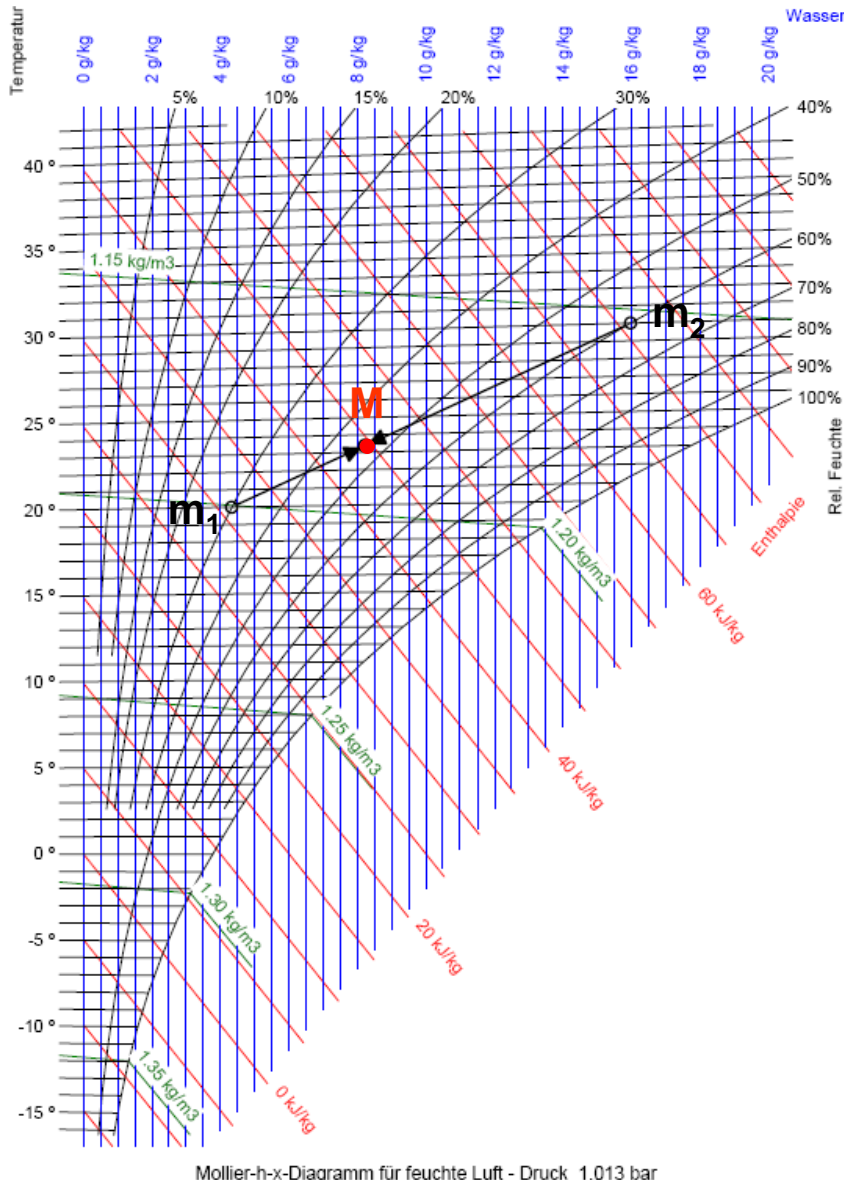
$$5) \quad h_{(30^{\circ}\text{C})} = \dots\dots\dots 71,06 \text{ kJ/kg}$$

$$6) \quad x_M = (5.000 \cdot 4,33 + 2.500 \cdot 15,99) / 7.500 = \underline{8,22 \text{ g/kg}}$$

$$7) \quad h_M = (5.000 \cdot 31,15 + 2.500 \cdot 71,06) / 7.500 = \underline{44,45 \text{ kJ/kg}}$$

$$8) \quad h_M = 1,006 \cdot t_M + x_M (1,86 \cdot t_M + 2.502)$$

$$t_M = (h_M - x_M \cdot 2.502) / (1,006 + x_M \cdot 1,86) = \underline{23,38 \text{ }^{\circ}\text{C}}$$



Mischung zweier Luftströme

„ Mischkammer “

Mischen von 2 Luftmengen → AHH Programm

		Luftstrom 1
Temperatur	°C	20.000
Rel. Feuchte	%	30.000
Abs. Feuchte	g/kg	4.329
Dichte feucht	kg/m ³	1.200
Enthalpie feucht	kJ/kg	31.113
Volumenstrom feucht	m ³ /h	4183.205
Massenstrom trocken	kg/h	5000.000
Kondensatmenge	kg/h	

Luftstrom 2	Mischluft
30.000	→ 23.381
60.000	→ 46.038
15.986	→ 8.215
1.153	→ 1.184
71.055	→ 44.427
2203.189	→ 6386.527
2500.000	→ 7500.000
	→ 0.000

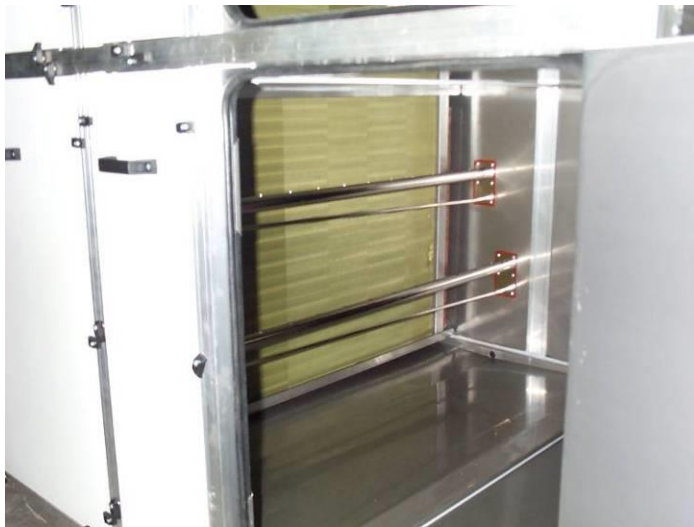
Befeuchtung

Wasser wird Luft im molekularem Zustand beigemischt:

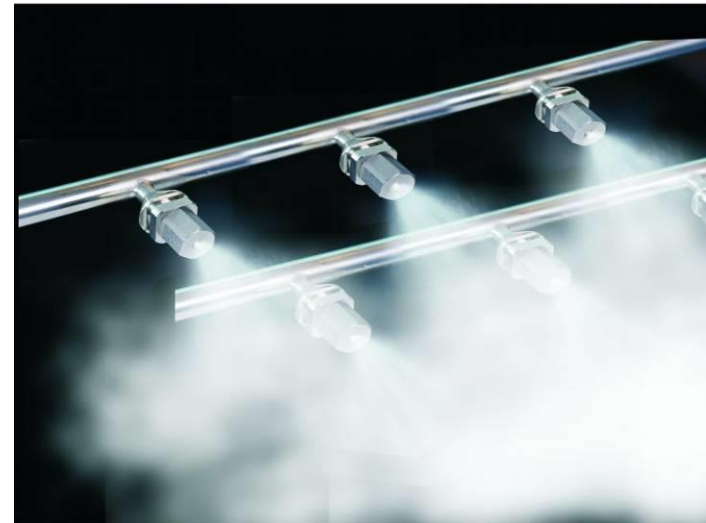
- Verdunsten (durch zerstäuben von Wasser)
 - Düsen (Luftwäscher)
 - Rotation (Scheibenzerstäuber)
- Verdunsten (eines Wasserfilms bzw. einer benetzten Oberfläche)
 - Riesel- (Verdunstungs-) Befeuchter
 - Hybridbefeuchter
- Verdampfen (Erzeugen von Wasserdampf)
 - Dampfnetz / Dampfkessel
 - Ambulante Dampferzeuger

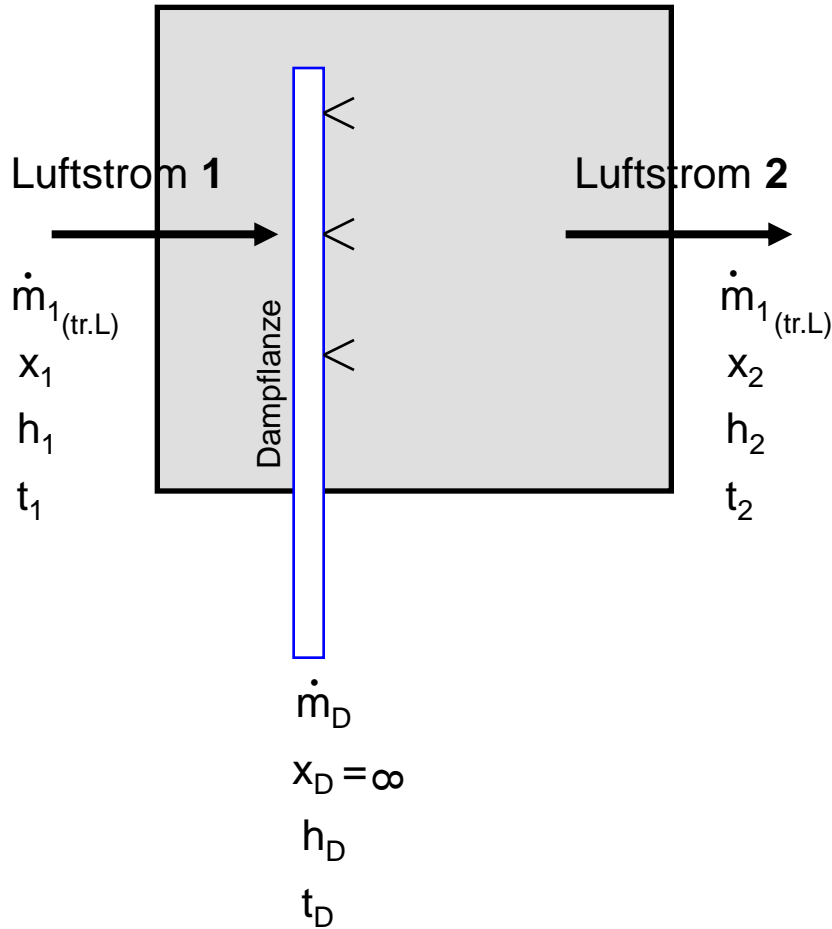
Befeuchtung

... mit Dampf



... mit Wasser





Dampfbefeuchtung

Wasserbilanz:

$$\dot{m}_1 \cdot x_1 + \dot{m}_D = \dot{m}_1 \cdot x_2 / \dot{m}_1$$

$$x_2 - x_1 = \dot{m}_D / \dot{m}_1$$

Energiebilanz:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_D \cdot h_D = \dot{m}_1 \cdot h_2 \quad [/ \dot{m}_1]$$

$$h_2 - h_1 = \dot{m}_D / \dot{m}_1 \cdot h_D$$

Randmaßstab:

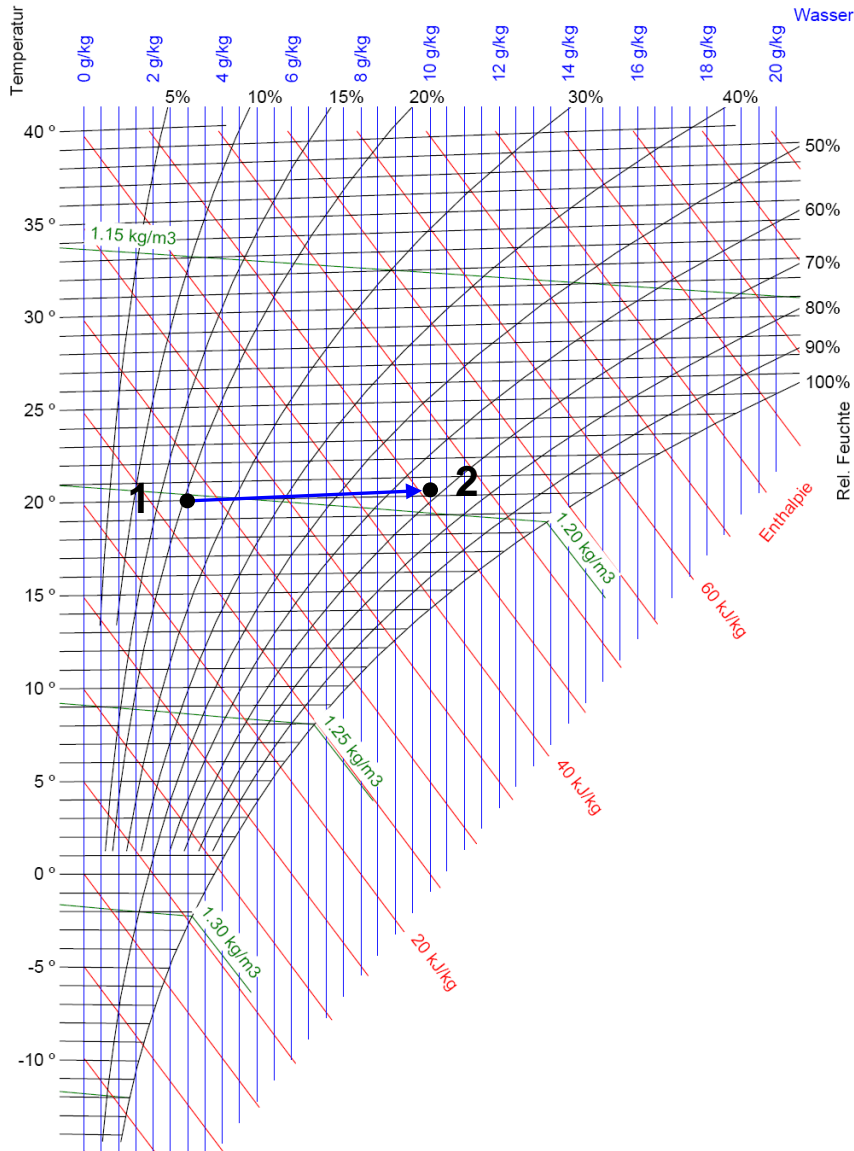
$$\Delta h / \Delta x = \cancel{\dot{m}_D} / \cancel{\dot{m}_1} \cdot h_D \cdot \cancel{\dot{m}_D} / \cancel{\dot{m}_1}$$

$$\Delta h / \Delta x = h_D = c_{pD} \cdot t_D + r_D$$

Dampfbefeuchtung

Die Richtung der Zustandsänderung $\Delta h / \Delta x$ ist identisch mit der Enthalpie des zugeführten Dampfes.

Die Steigung der Isothermen mit $1,86 \cdot t_L$ und die Steigung der Richtungsgeraden der Dampfbefeuchtung mit $1,86 \cdot t_D$ unterscheiden sich lediglich geringfügig durch $1,86 \cdot (t_D - t_L)$.



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Dampfbefeuchtung

$$\Delta h / \Delta x = h_D = c_{pD} \cdot t_D + r_D$$

Beispiel: (Dampf 100 °C)

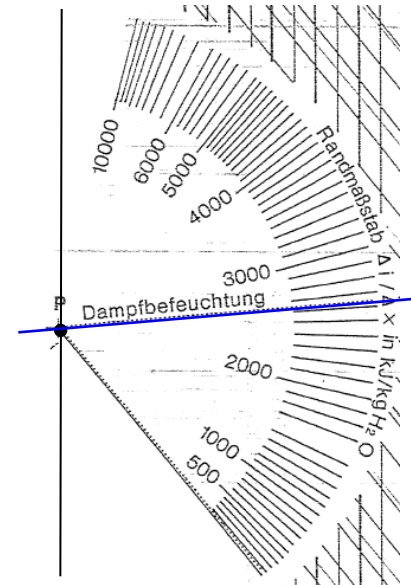
$$h_D = 1,86 \cdot 100 + 2.502$$

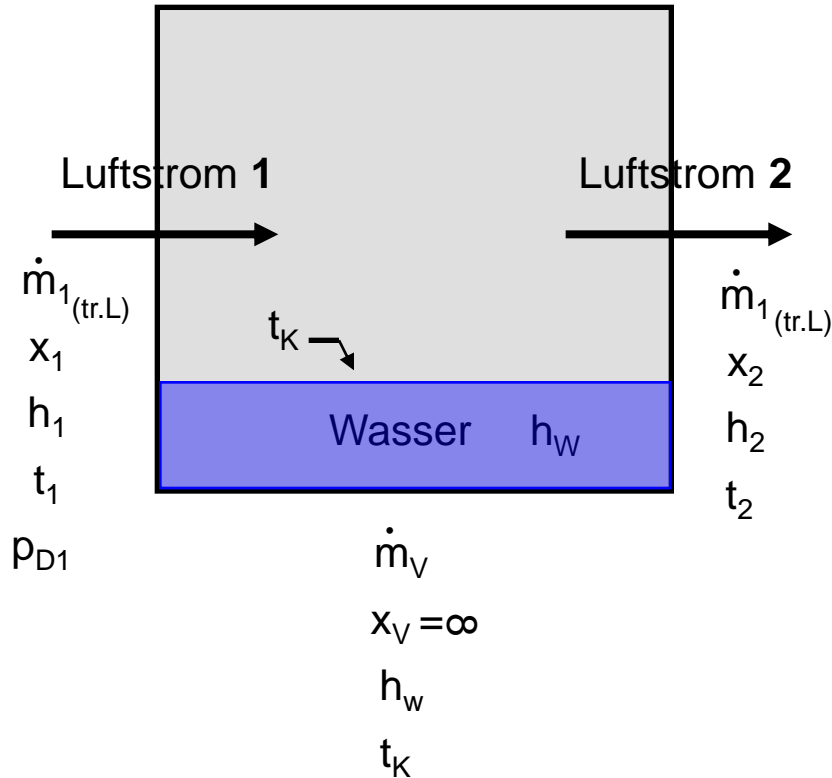
Beispiel:

Luft₁ t = 20 °C /
φ = 20 % wird
befeuchtet auf
x₂ = 10 g/kg.

Steigung Δh / Δx =
2.688 kJ/kg
(Isotherme =
2.539 kJ/kg)

→ „quasi isotherm“





Befeuchten mit Wasser

Wasserbilanz:

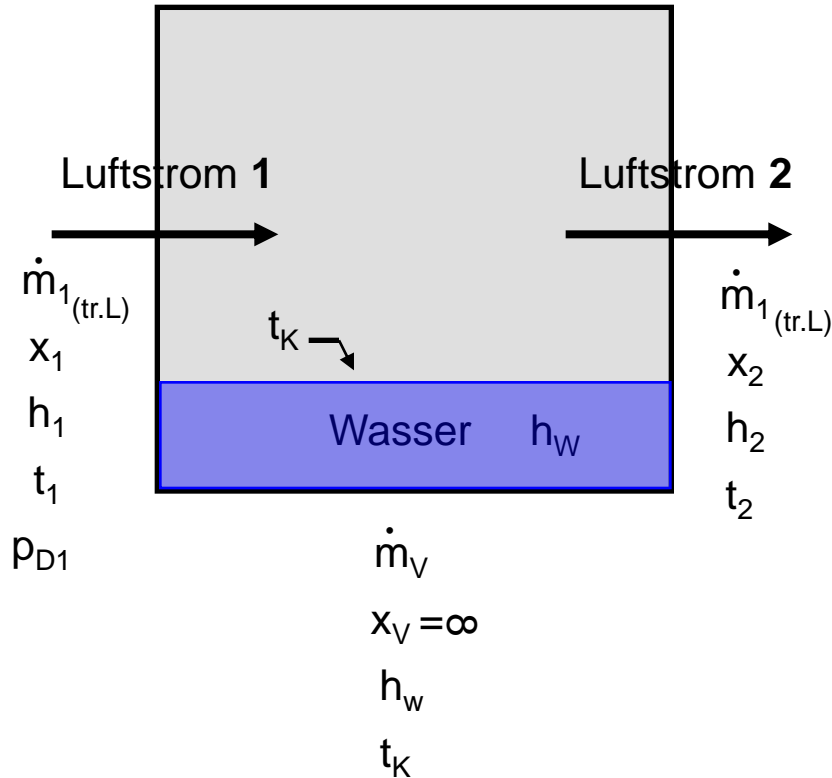
$$\dot{m}_1 \cdot x_1 + \dot{m}_V = \dot{m}_1 \cdot x_2$$

Gesetz nach Dalton:

$$\dot{m}_V = \beta \cdot A \cdot (p_{D'K1} - p_{D1})$$

$$x \sim p_D \rightarrow \dot{m}_V = \beta \cdot A \cdot (x_{K1} - x_1)$$

$$x_2 - x_1 = \beta \cdot A \cdot (x_{K1} - x_1) / \dot{m}_1$$



Befeuchten mit Wasser

Energiebilanz:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_V \cdot h_W = \dot{m}_1 \cdot h_2 \quad [/ \dot{m}_1]$$

$$h_2 - h_1 = \dot{m}_V / \dot{m}_1 \cdot h_W$$

$$\Delta h = \beta \cdot A \cdot (x_{K1} - x_1) / \dot{m}_1 \cdot h_W$$

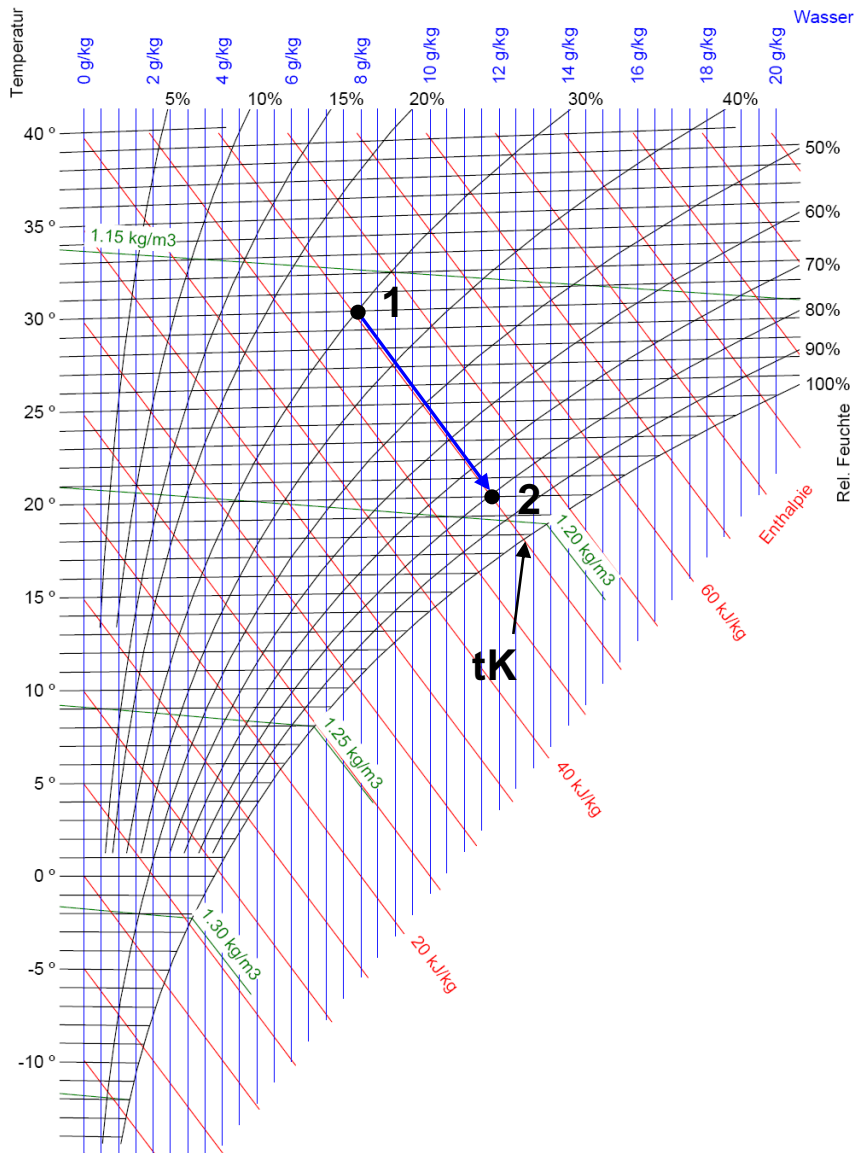
Randmaßstab:

$$\Delta h / \Delta x = h_W = c_W \cdot t_{K1}$$

Befeuchten mit Wasser

Die Richtung der Zustandsänderung $\Delta h / \Delta x$ ist identisch mit der spezifischen Enthalpie des zugeführten Wassers.

Die Steigung der Isenthalpen mit 2.502 kJ/kg und die Steigung der Richtungsgeraden der Befeuchtung mit Wasser mit $2.502 + c_W \cdot t_K$ unterscheiden sich lediglich geringfügig durch $c_W \cdot t_K$.



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

$$\Delta h / \Delta x = h_W = c_W \cdot t_{K1}$$

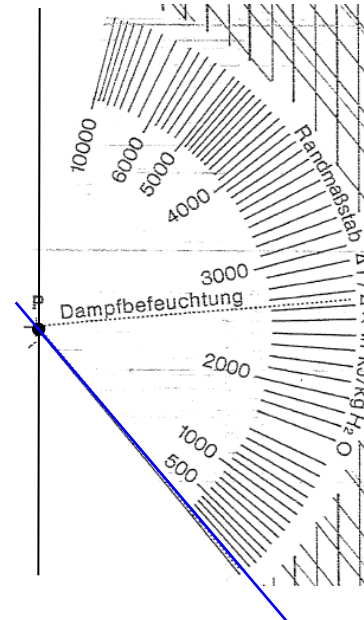
Beispiel: ($t_K = 18 \text{ °C}$)

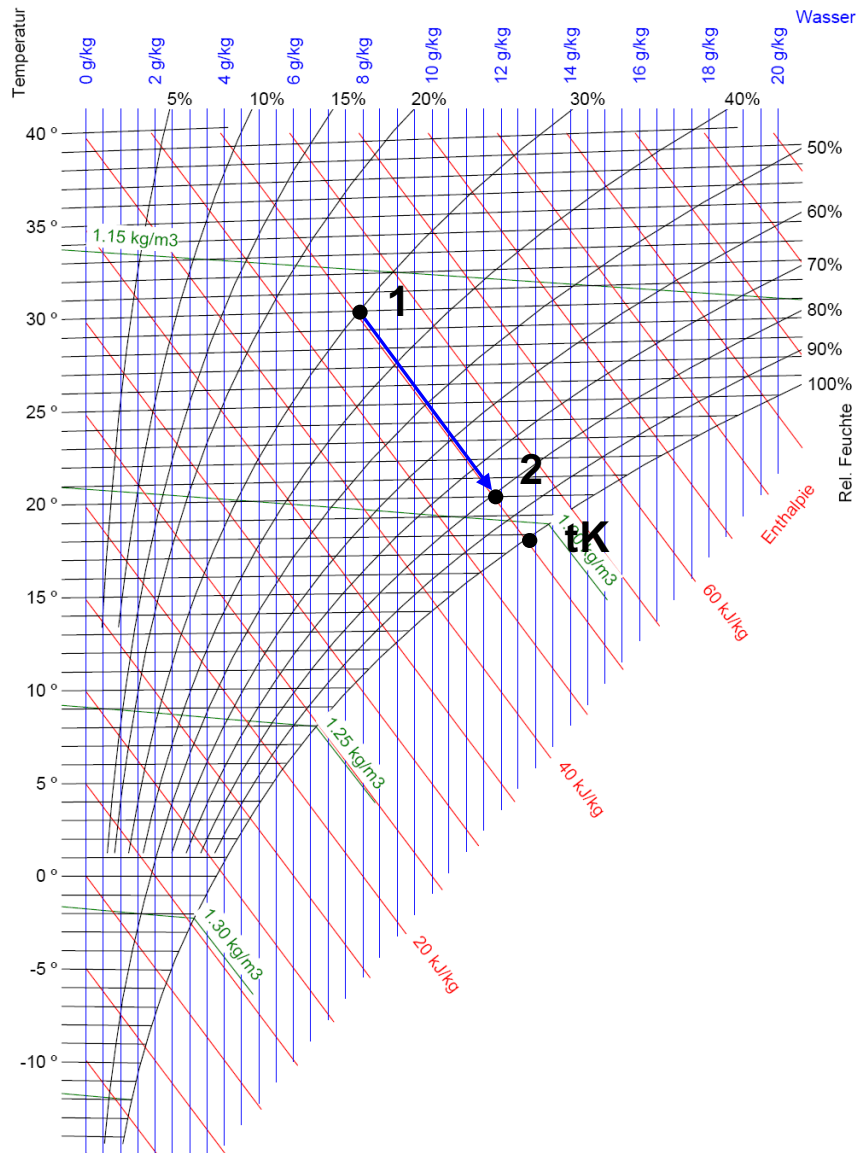
$$\Delta h / \Delta x = 4,15 \cdot 18 = 75 \text{ kJ/kg}$$

Beispiel:

Luft₁ $t = 30 \text{ °C}$ /
 $\varphi = 30 \%$ wird
befeuchtet mit
Wasser auf
 $\varphi_2 = 80 \%$.

Steigung
 $\Delta h / \Delta x = 75 \text{ kJ/kg}$
(Isenthalpe = 0 kJ/kg)
→ „*quasi adiabat*“





Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

Befeuchtungsgrad:

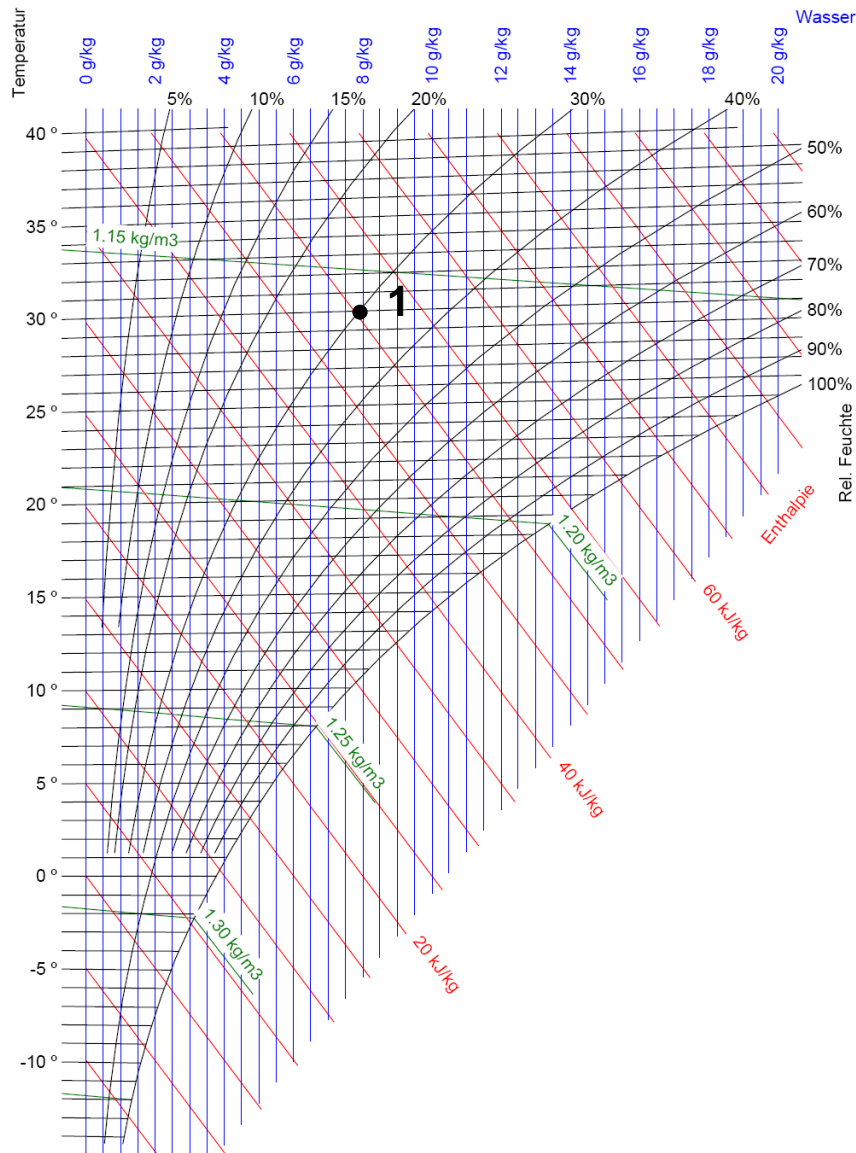
$$\eta_{BF} = (x_2 - x_1) / (x_{tK} - x_1)$$

Befeuchtungsgrad:

$$\eta_{BF} = (t_2 - t_1) / (t_K - t_1)$$

Befeuchtungsgrad:

$$\eta_{BF} = \overline{(1 - 2)} / \overline{(1 - t_K)}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

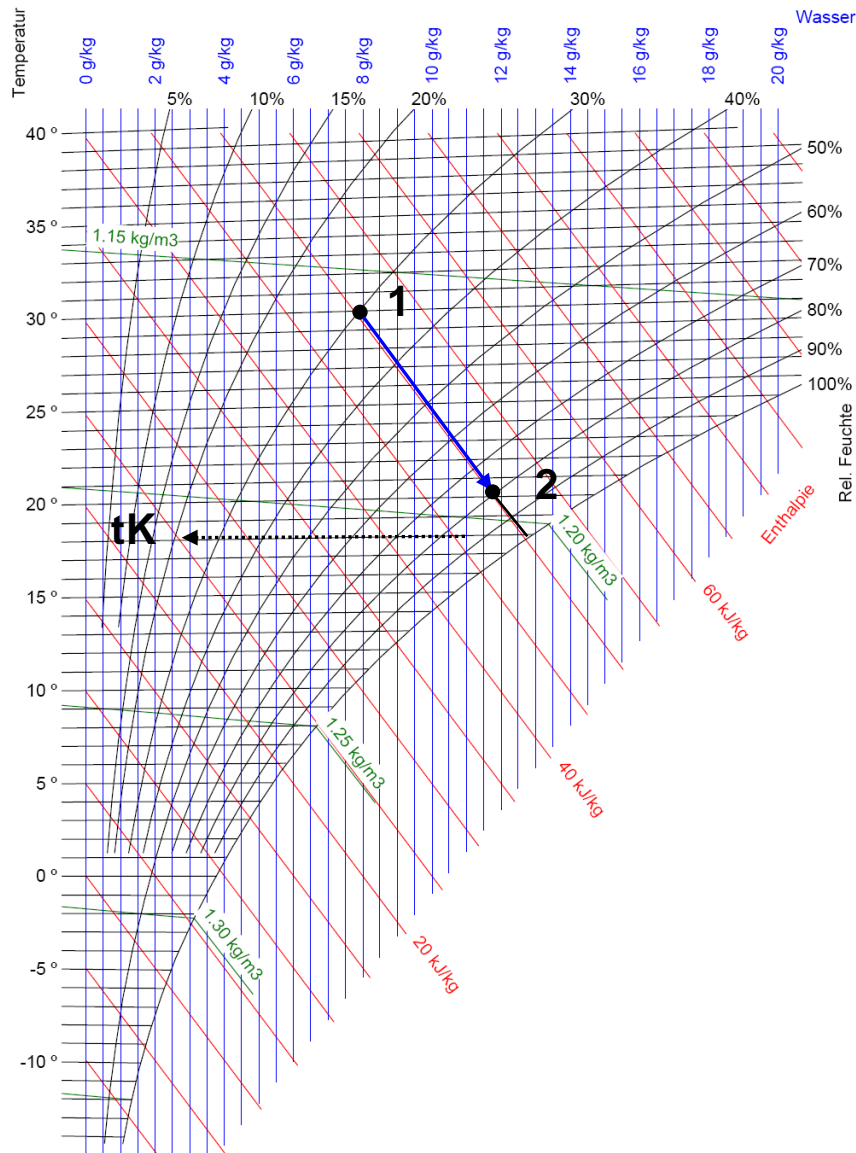
Übung:

Luftmassenstrom (1) = 5.000 kg/h
mit einer Trockenkugeltemperatur
 $t_1 = 30 \text{ °C}$ ($\varphi_1 = 30 \%$) wird adiabat
(Wasser 0 °C) befeuchtet.

$\eta_{BF} = 80 \%$.

ges.:

- Feuchtkugeltemperatur t_K ,
- Luftaustritzzustand₂ (h_2, φ_2)
- benötigte Wassermenge
- Verdunstungsleistung
- t_2



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

Lösung: (HX-Diagramm)

Kühlgrenztemperatur:

$$t_K = 17,85 \text{ °C } (\varphi = 100 \%)$$

Befeuchtungsgrad:

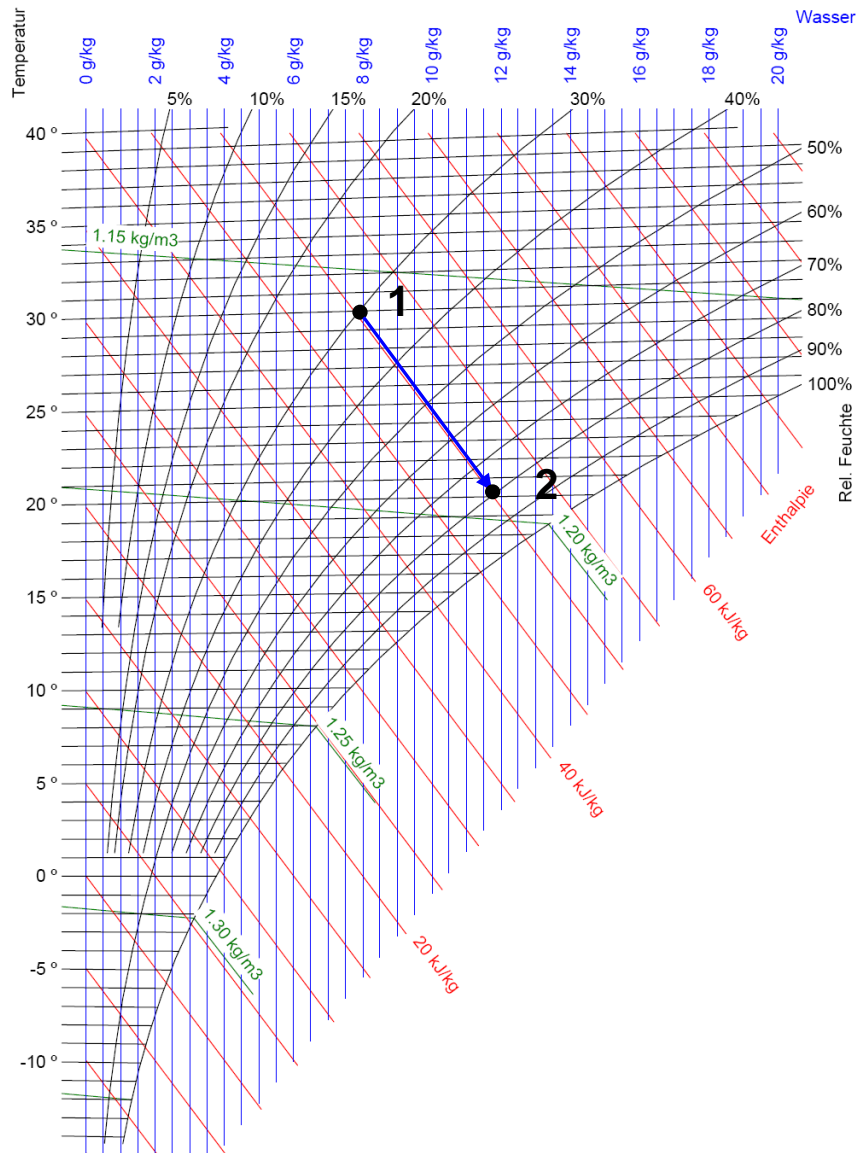
$$0,8 = (x_2 - 7,89) / (12,79 - 7,89)$$
$$x_2 = 11,81 \text{ g/kg}$$

Luftaustritzzustand₂:

$$h_2 = 50,37 \text{ kJ/kg}$$

$$t_2 = 20,26 \text{ °C}$$

$$\varphi_2 = 79,6 \%$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

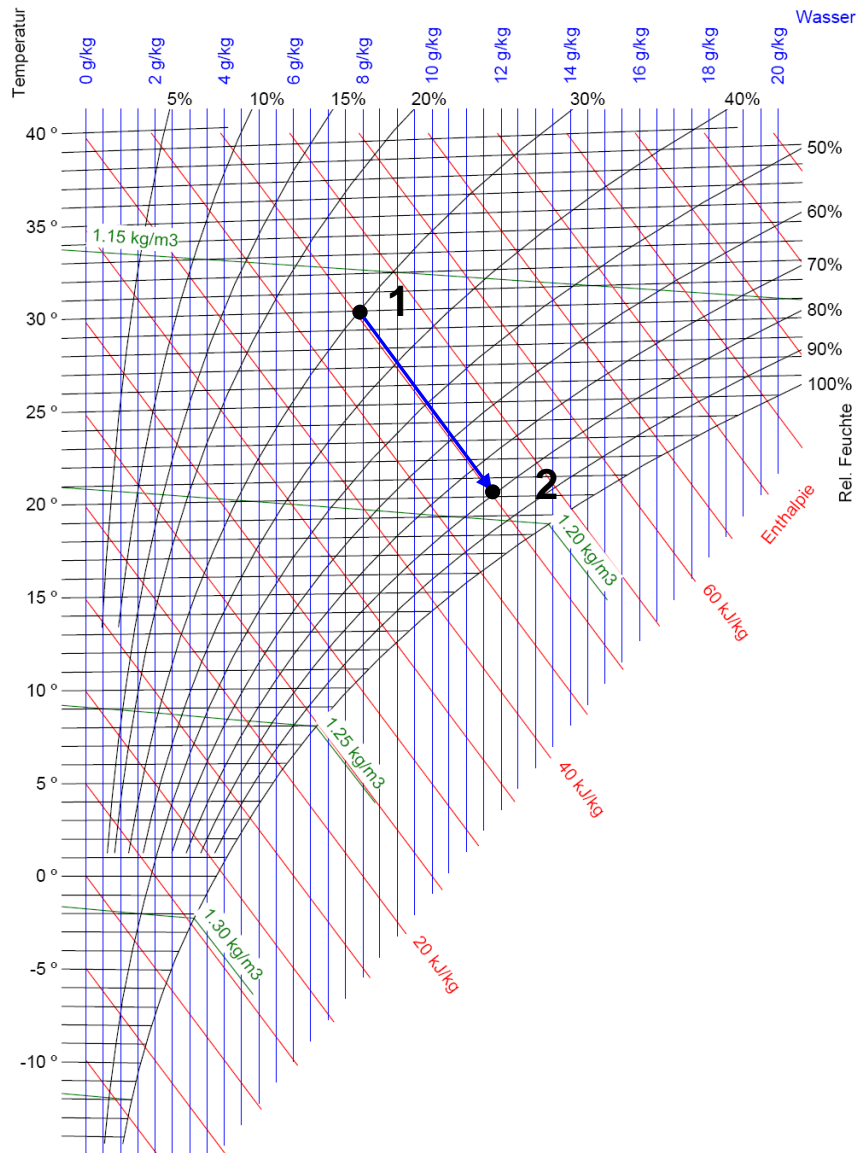
Lösung:

Befeuchtungswassermenge \dot{m}_{BF}

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_2 - x_1 = 11,81 - 7,89 \\ &= 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_W / \text{kg}_{tr.L} \\ &\quad \cdot 5.000 \text{ kg}_{tr.L} / \text{h} \\ &= \underline{19,6 \text{ Kg}_W / \text{h}} \end{aligned}$$

Verdunstungsleistung:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_V &= \dot{m}_{BF} \cdot (2.502 + 1,86 \cdot t) \\ &= 19,6 \cdot 2.502 = \underline{13,62 \text{ kW}} \end{aligned}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Befeuchten mit H₂O

Lösung:

Luftaustritt t_2 :

aus HX $\rightarrow t_2 = 20,26 \text{ }^\circ\text{C}$

aus Verdunstungsleistung \rightarrow

$$\begin{aligned} \dot{Q}_V &= \dot{m}_{BF} \cdot (2502 \cdot 1,86 \cdot t) \\ &= 19,6 \cdot 2502 = 13,622 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_{tr.L} \cdot c_{pL} \cdot (t_1 - t_2)$$

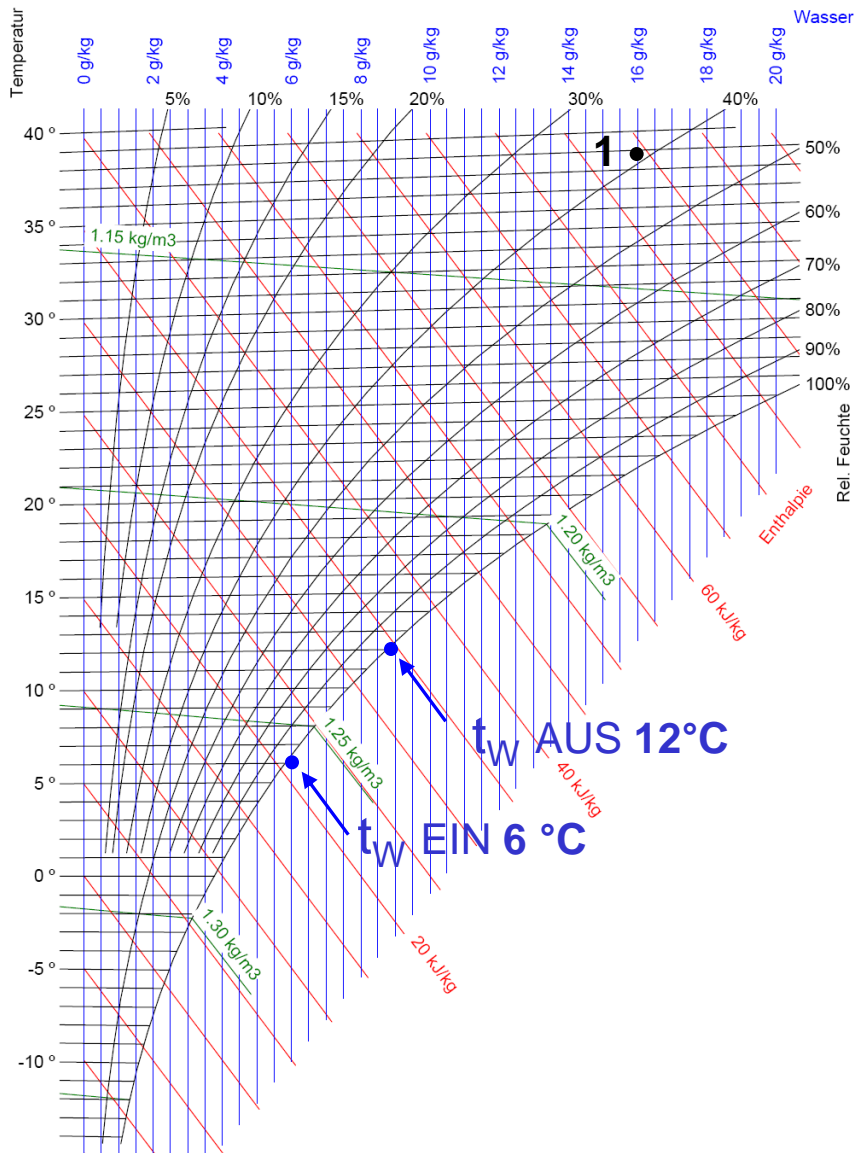
$$\Delta t = 13,622 / 5.000 \cdot 3.600 / 1,006$$

$$\Delta t = 9,74 \text{ K}$$

$$t_2 = 30 - 9,74 = \underline{20,26 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Kühlung mit Entfeuchtung

Wasserausscheidung und damit Entfeuchtung findet statt, wenn die kälteste Rohroberflächentemperatur des Wärmeübertragers (bei Vorlauf $t_{W \text{ EIN}}$ z. B. $6 \text{ }^\circ\text{C}$) unterhalb der Taupunkttemperatur der Luft (Eintrittszustand₁) liegt.



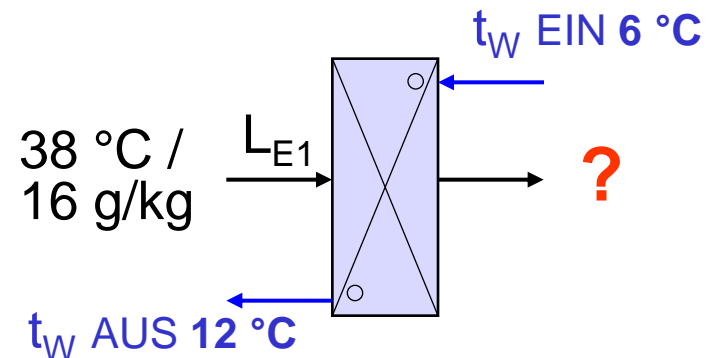
Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Kühlung mit Entfeuchtung $x \neq \text{konstant}$

„feuchter Kühler“

Beispiel:

Kühlung von $t_1 = 38 \text{ °C}$ /
 $x = 16 \text{ g/kg}$ auf $t_2 = 20 \text{ °C}$
(Kühlmedium: Wasser 6 / 12 °C)



Kühlung mit Entfeuchtung

wirksame oder effektive Oberflächentemperatur
 $t_{O \text{ eff}}$ (auch Apparatetaupunkt - Näherungsgleichung)

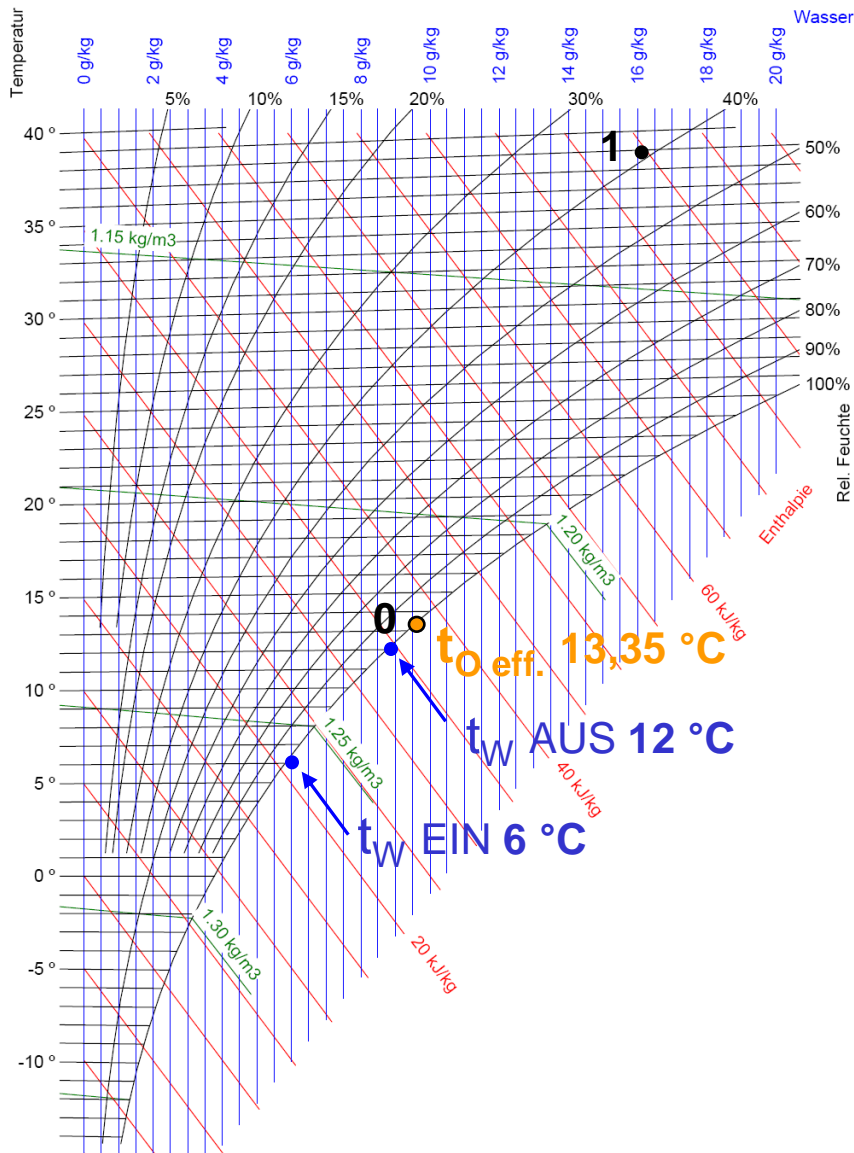
In der Klimatechnik: Lamellenabstand etwa 2,5 mm

Rippenrohrwirkungsgrad $\eta_R \sim 85 \%$

$t_{O \text{ eff.}}$ liegt um $0,15 \cdot (t_{LE} - t_{W m})$ höher als die mittlere Wassertemperatur $t_{W m}$

$$t_{W m} = (t_{W \text{ EIN}} + t_{W \text{ AUS}}) / 2$$

$$t_{O \text{ eff.}} = t_{W m} + 0,15 \cdot (t_{LE} - t_{W m})$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

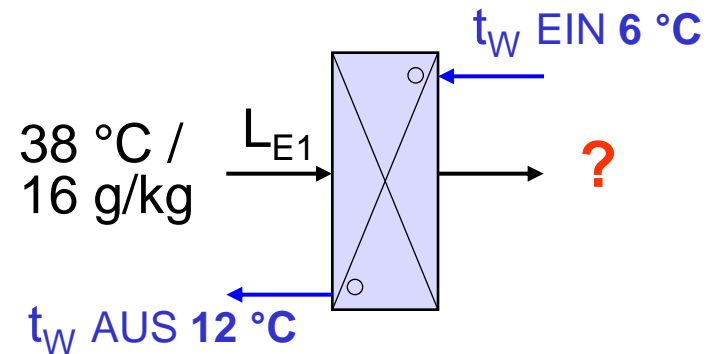
Kühlung mit Entfeuchtung $x \neq \text{konstant}$

„feuchter Kühler“

Beispiel:

$$t_{Wm} = 12 + 6 / 2 = 9 \text{ °C}$$

$$t_{O \text{ eff.}} = 9 + 0,15 \cdot (38 - 9) = \underline{13,35 \text{ °C}}$$

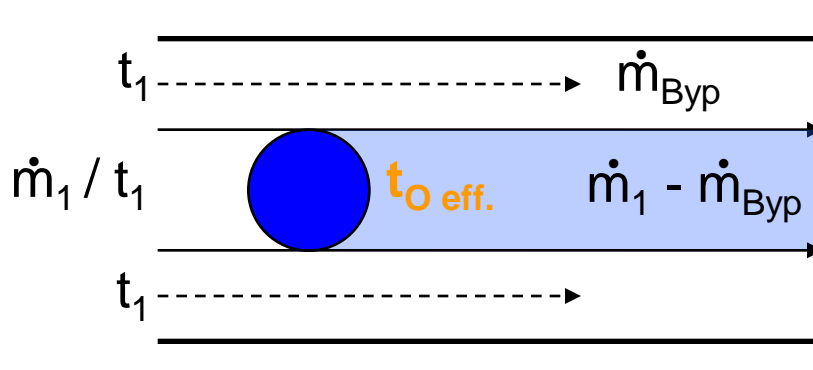


Kühlung mit Entfeuchtung „einstufig“

Im h - x Diagramm liegt die Zustandsänderung auf der Geraden $\overline{1-0}$ ($0 =$ gesättigte Luft von der Temperatur der Rohroberfläche $t_{O\text{ eff.}}$), wobei $t_{O\text{ eff.}}$ vereinfacht unter dem Ansatz einer gleichbleibenden **Wassertemperatur** (Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf) bei „einstufiger“ Betrachtung **als konstant** über alle Rohrreihen angenommen wird (Mischungsgleichung).

Kühlung mit Entfeuchtung

Entfeuchtungsgrad η_K



$$\eta_K = (x_1 - x_2) / (x_1 - x_0)$$

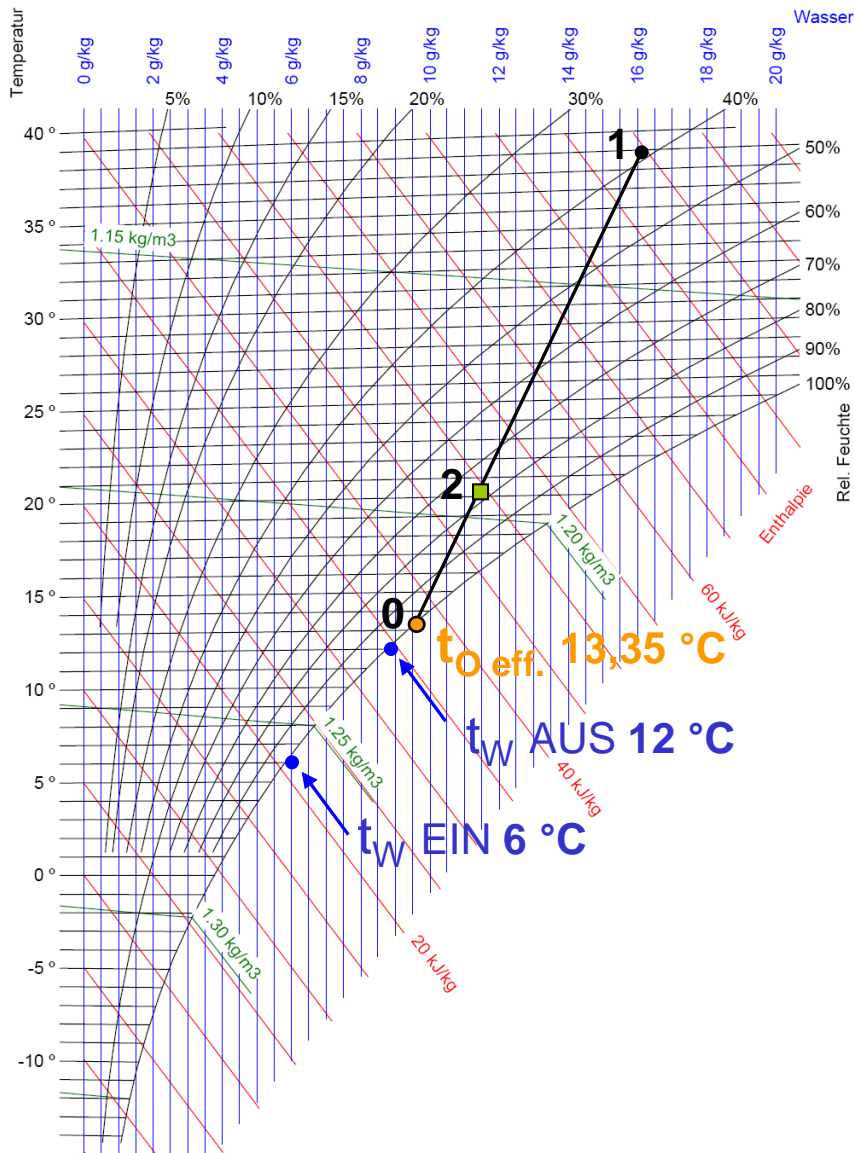
$$\eta_K = (t_1 - t_2) / (t_1 - t_{O \text{ eff.}})$$

$$\eta_K = (\overline{l_1 - l_2}) / (\overline{l_1 - l_0})$$

Hebelgesetz der Mischkammer

$$\dot{m}_{\text{Byp}} \cdot (\overline{l_1 - l_2}) =$$

$$(\dot{m}_1 - \dot{m}_{\text{Byp}}) \cdot (\overline{l_2 - l_0})$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Kühlung mit Entfeuchtung $x \neq \text{konstant}$

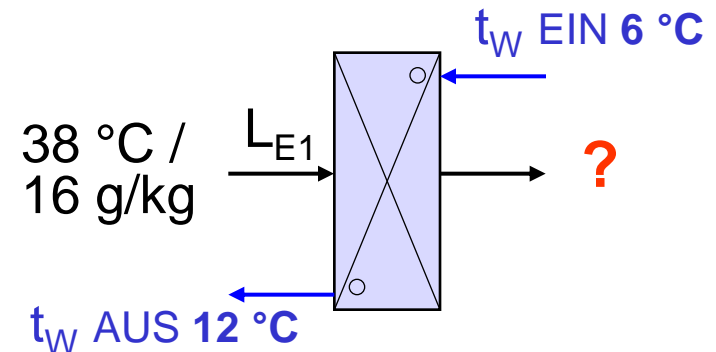
„feuchter Kühler (einstufig)“

Beispiel:

$$\eta_K = (t_1 - t_2) / (t_1 - t_{O \text{ eff.}})$$

$$\eta_K = (38 - 20) / (38 - 13,35)$$

$$\eta_K = 73 \% \rightarrow x_K = 11,4 \text{ g/kg}$$



Kühlung mit Entfeuchtung „mehrstufig“

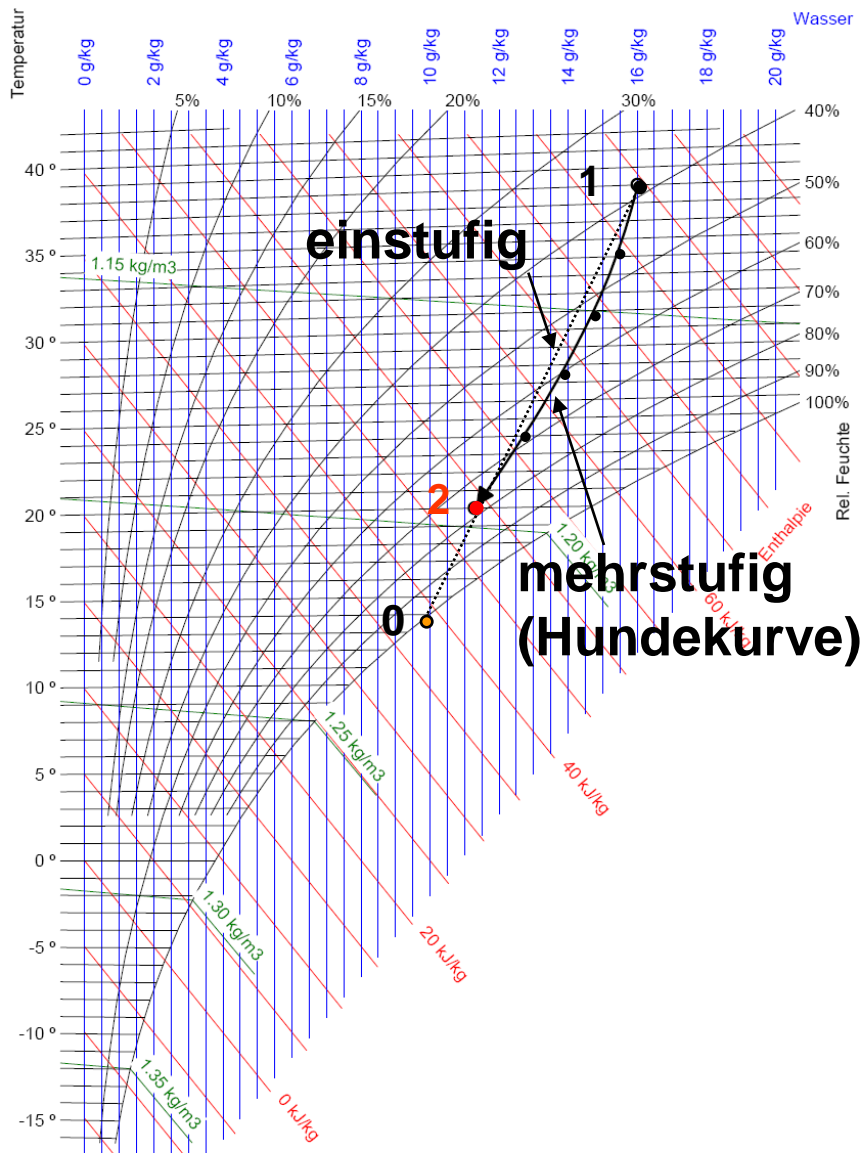
Tatsächlich verändert sich jedoch die Wassertemperatur und damit $t_{O\text{ eff.}}$ von Rohrreihe zu Rohrreihe, außerdem sind einige Rohrreihen trocken und andere nass.

Die genaue Berechnung für eine **reale Abbildung** des Kühl- und Entfeuchtungsprozesses muss demnach schrittweise in mehreren Stufen erfolgen.

Kühlung mit Entfeuchtung „mehrstufig“

Bei dieser Vorgehensweise ist $t_{O \text{ eff.}}$ je Stufe, ausgehend von der jeweils mittleren Wassertemperatur, immer neu zu berechnen.

Die Zustandsänderung der Luft verläuft dann tatsächlich nicht auf einer Geraden, sondern „mehrstufig“ auf einer gekrümmten Kurve (s. g. „**Hundekurve**“).



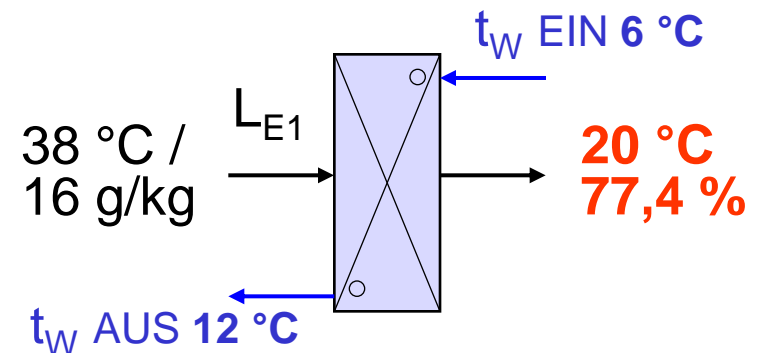
Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Kühlung mit Entfeuchtung $x \neq \text{konstant}$

„feuchter Kühler (mehrstufig)“

Beispiel:

Rohroberfläche ist nicht konstant



Wärmerückgewinnung

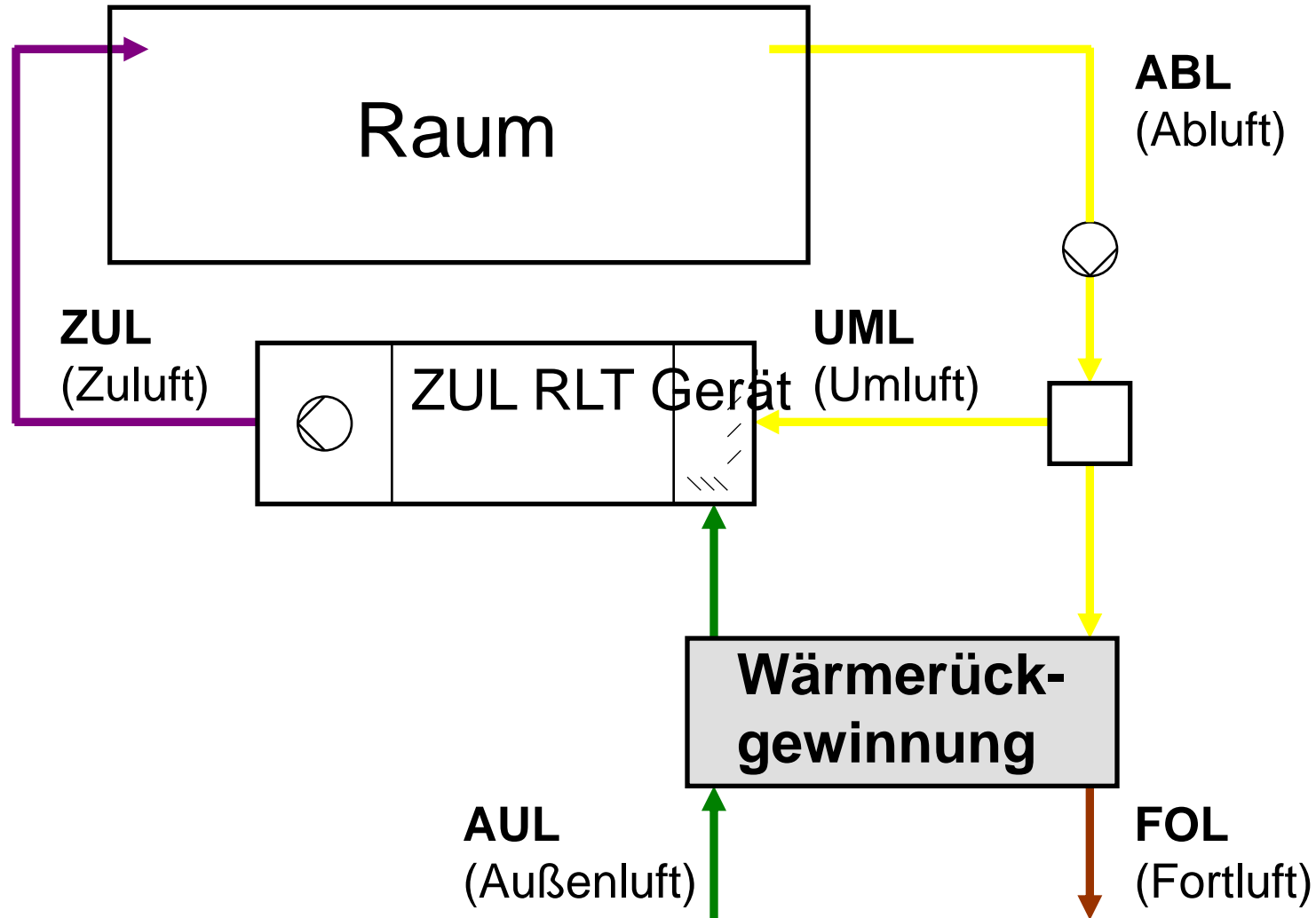
Wärmerückgewinnung (WRG) ist ein Sammelbegriff für Verfahren zur **Wiedernutzbarmachung** von **thermischer Energie** in einem Prozess mit mindestens zwei **Massenströmen** die **unterschiedliche Temperaturniveaus** besitzen.

Ziel der **Wärmerückgewinnung** ist die **Minimierung** des **Primärenergiebedarfs**.

Wärmerückgewinnung ist damit die **Nutzung** der **ENTHALPIE** eines **Fortluft- oder Außenluftstromes** (Wärme oder Kälte) in Verbindung mit einem **WRG-System**.

WRG ist die **Wärmeübertragung** von **Fort- und Außenluftströmen** in Lüftungstechnischen Prozessen.

Dabei wird die zurück gewonnene Wärme entweder dem **Ursprungsprozess** oder einem **anderen Prozess** zugeführt.



Wärmerückgewinnung (WRG)

Rückwärmzahl Φ

$$\Phi_{ZUL} = \frac{t_{ZUL} - t_{AUL}}{t_{ABL} - t_{AUL}}$$

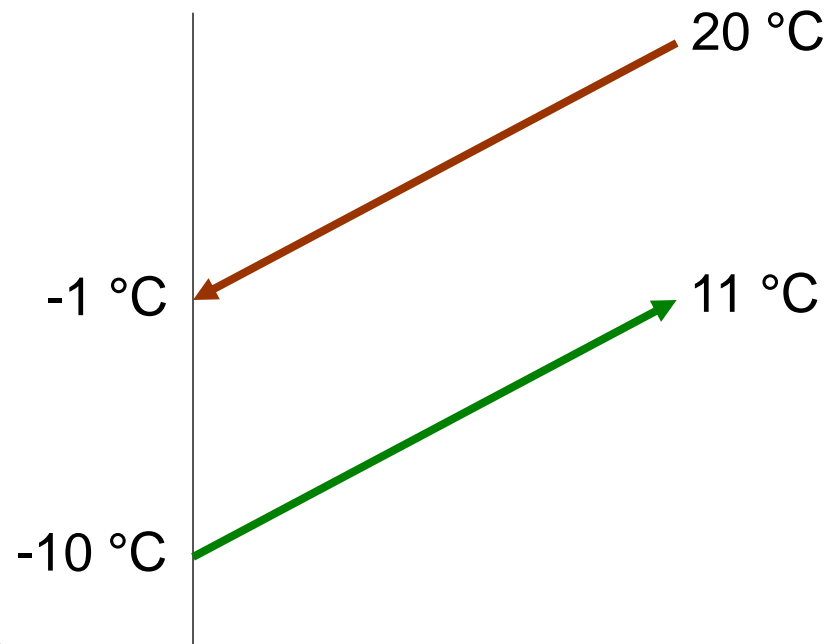
Beispiel ($\dot{m}_{ZUL} = \dot{m}_{ABL}$):

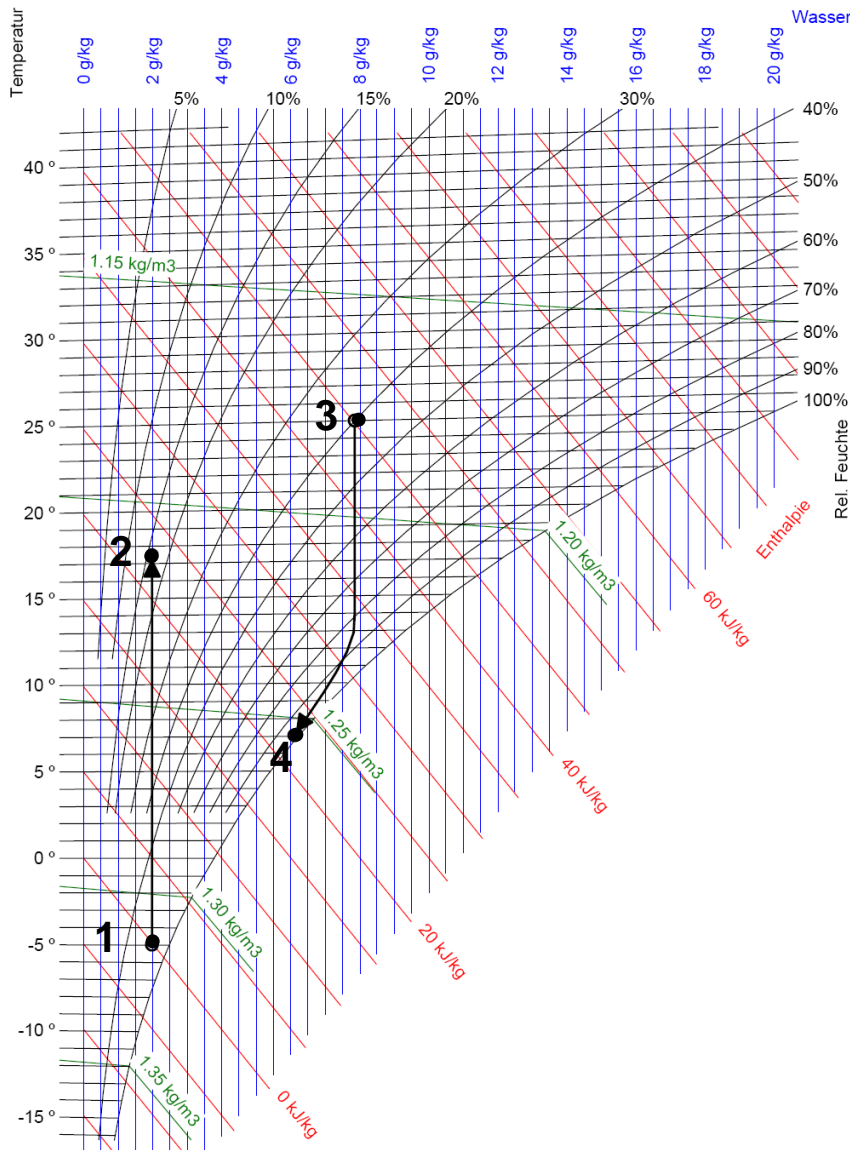
$$t_{AUL} = -10 \text{ °C}$$

$$t_{ABL} = 20 \text{ °C}$$

$$\Phi = 70 \%$$

$$t_{ZUL} = 0,70 \cdot (20 - (-10)) - 10$$
$$= \underline{\underline{11 \text{ °C}}}$$





Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Wärmerückgewinnung

Beispiel (Winterbetrieb):

$$\dot{m}_{ZUL} = \dot{m}_{ABL} = 10.000 \text{ kg}_L/\text{h}$$

$$AUL_1 : -5^\circ\text{C} / 80 \%$$

$$ABL_3 : 25^\circ\text{C} / 40 \%$$

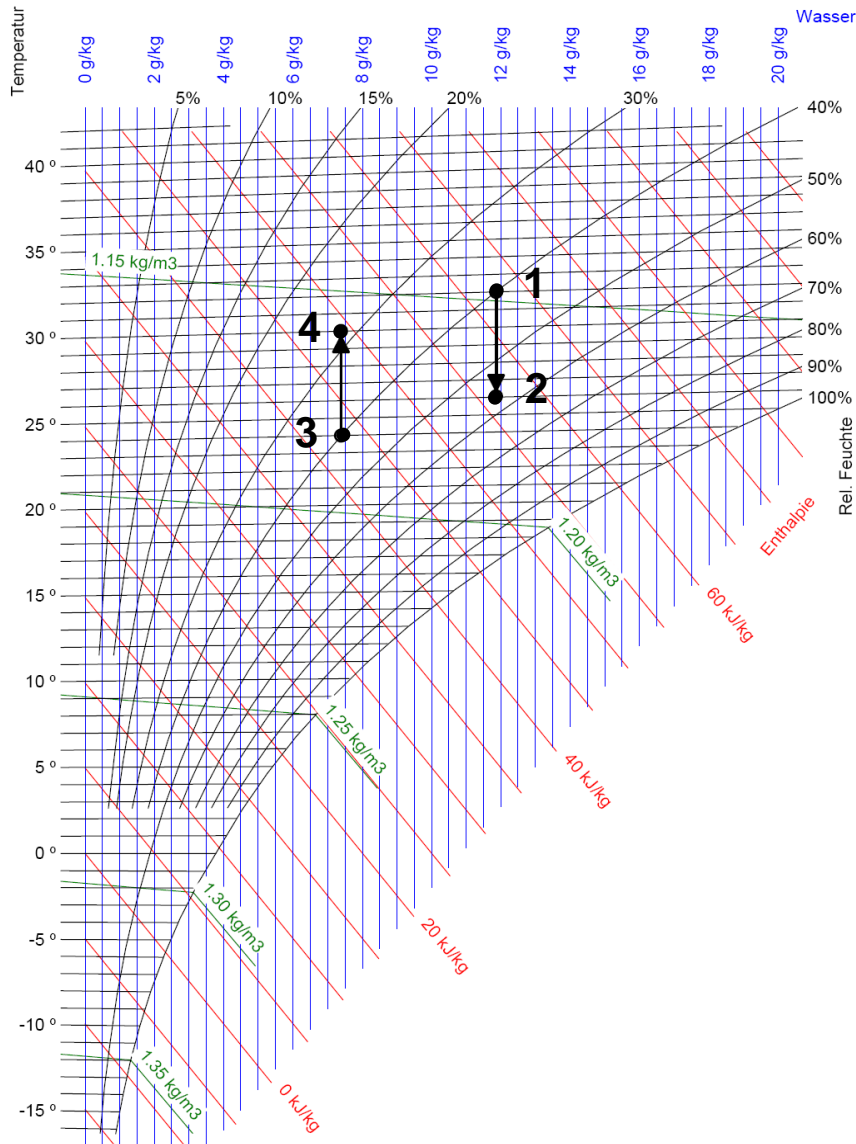
$$\Phi_{ZUL} = 75 \%$$

$$t_{ZUL} = 0,75 \cdot 30 - 5 = \underline{17,5 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q}_{1/2} = \dot{Q}_{3/4} =$$

$$10.000 / 3.600 \cdot 1.001 \cdot (17,5 + 5)$$

$$= \underline{62,6 \text{ kW}}$$



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Wärmerück- gewinnung

Beispiel (Sommerbetrieb):

$$\dot{m}_{ZUL} = \dot{m}_{ABL} = 10.000 \text{ kg}_L/\text{h}$$

$$AUL_1 : 32^\circ\text{C} / 40 \%$$

$$ABL_3 : 24^\circ\text{C} / 40 \%$$

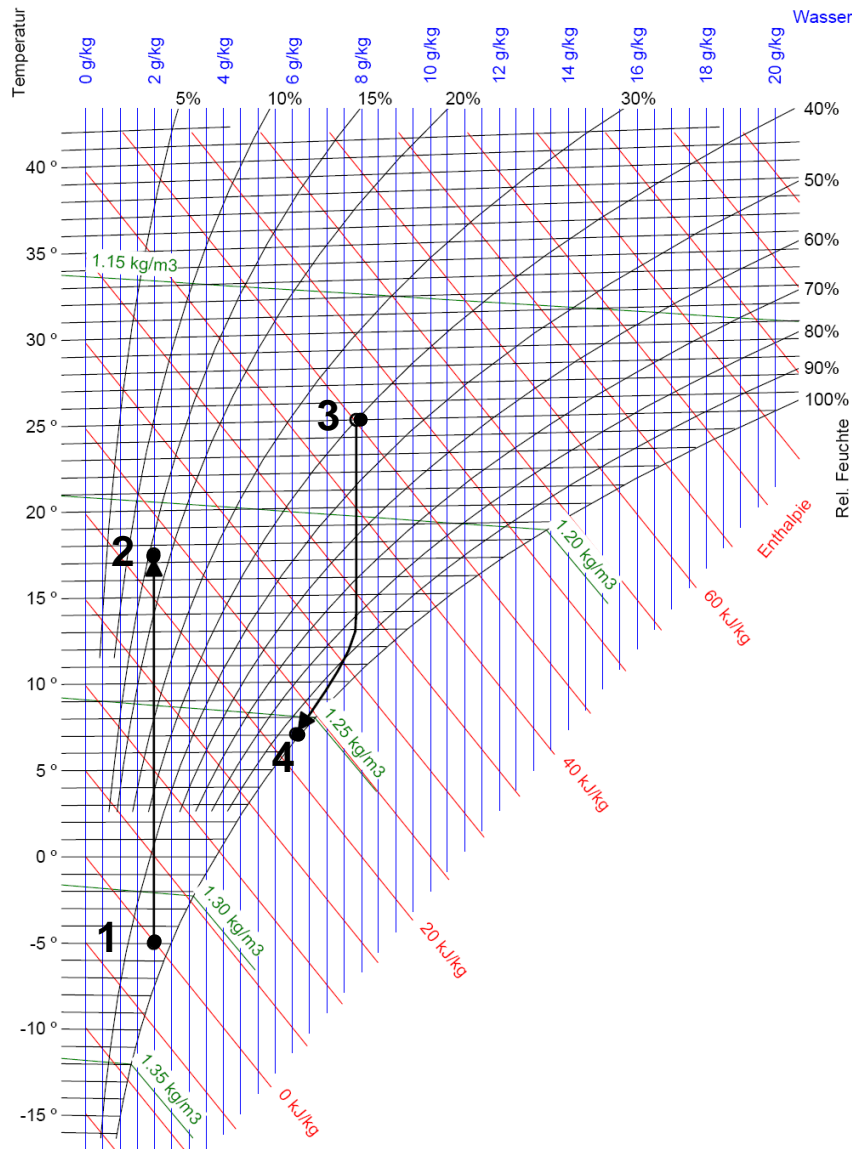
$$\Phi_{ZUL} = 75 \%$$

$$t_{ZUL} = 32 - 0,75 \cdot 8 = \underline{26^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q}_{1/2} = \dot{Q}_{3/4} =$$

$$10.000 / 3.600 \cdot 1.001 \cdot (32 - 26)$$

$$= \underline{16,7 \text{ kW}}$$

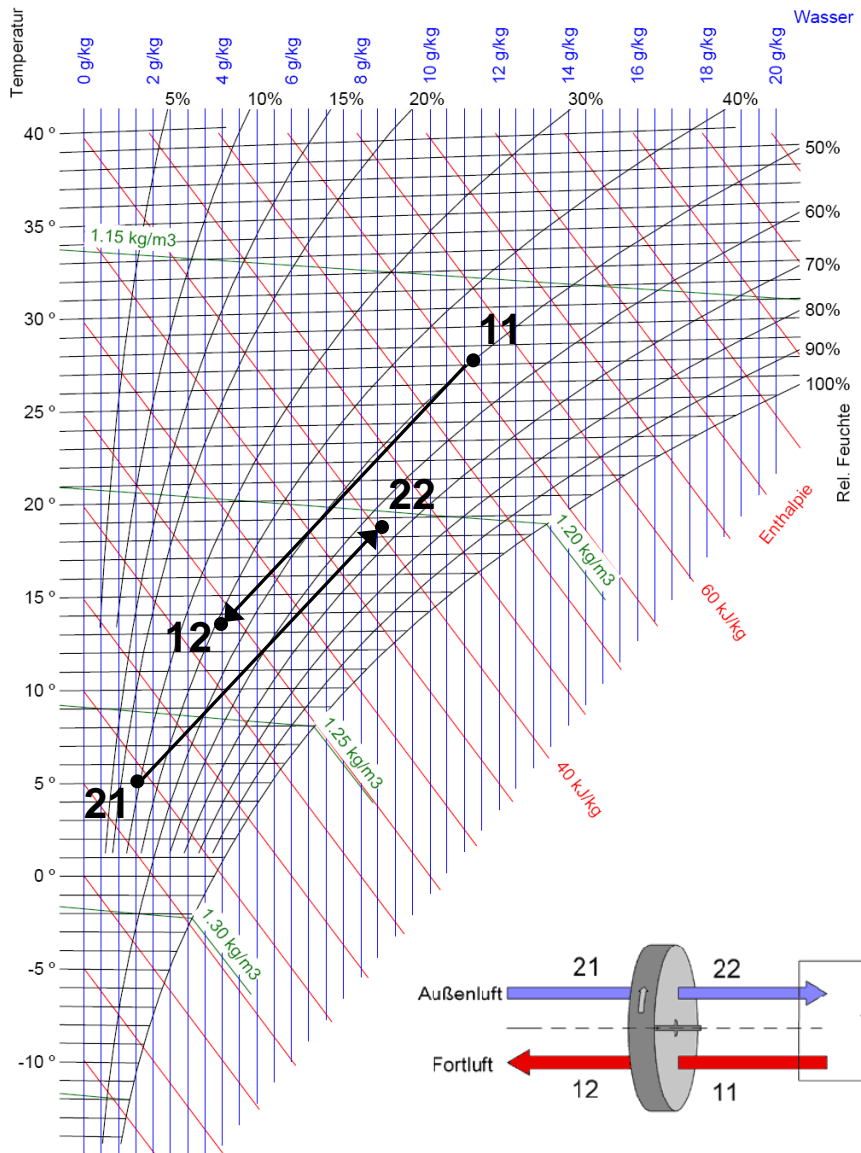


Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Wärmerückgewinnung

Rotationswärmeübertrager:

Kondensationsrotor für sensible Energierückgewinnung;
latent nur im Kondensationsfall



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

Wärmerückgewinnung

Rotationswärmeübertrager:

Enthalpierotor für sensible und latente Energierückgewinnung mit hygroskopischer Beschichtung zur zusätzlichen Feuchteübertragung

$$\Phi_{t(21)} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

$$\Phi_{x(21)} = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

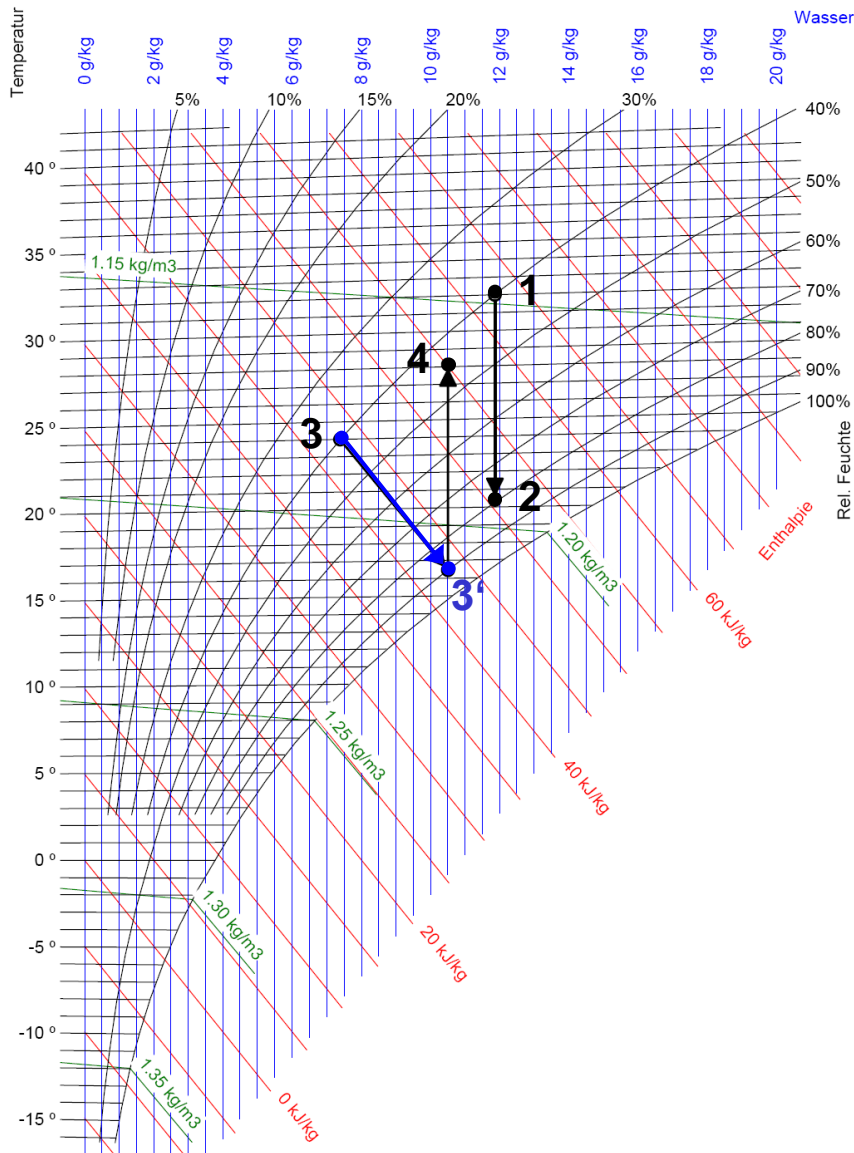
$$\Phi_t \neq \Phi_x$$

WRG mit indirekt adiabater Befeuchtung

z. B. Hybridsystem



Mit Befeuchtung in der Abluft



Mollier-h-x-Diagramm für feuchte Luft - Druck 1.013 bar

WRG mit ABL Befeuchtung

Beispiel (Sommerbetrieb):

$$\dot{m}_{ZUL} = \dot{m}_{ABL} = 10.000 \text{ kg}_L/h$$

$$AUL_1 : 32 \text{ °C} / 40 \%$$

$$ABL_3 : 24 \text{ °C} / 40 \%$$

$$\Phi_{ZUL} = 75 \%$$

$$t_{ZUL} = 32 - 0,75 \cdot 8 = 15,5$$

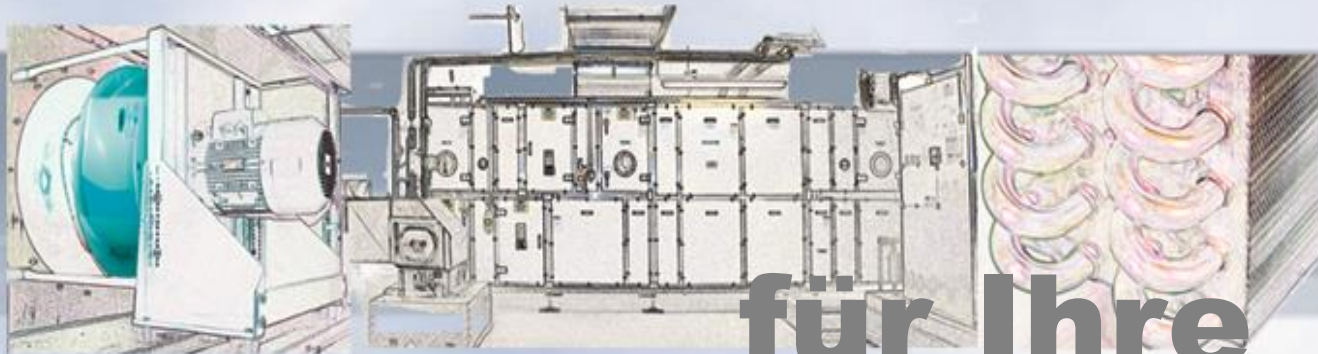
$$= 26 \text{ °C} \underline{20,4 \text{ °C}}$$

$$\dot{Q}_{1/2} = \dot{Q}_{3/4} =$$

$$10.000 / 3.600 \cdot 1.001 \cdot (32 - 20,4)$$

$$= \underline{32,3 \text{ kW}}$$

Herzlichen Dank



für Ihre
Aufmerksamkeit

Raumlufttechnik hx-Diagramm

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Dipl.-Ing. **Christian Backes**
backes@howatherm.de

Prof. Dr.-Ing. **Christoph Kaup**
c.kaup@umwelt-campus.de



HOCHSCHULE TRIER
Umwelt-Campus Birkenfeld