

2 Zustandsänderungen

Für die Praxis sind Zustandsänderungen, d. h. die Veränderung der Temperatur und/oder des Feuchtegehalts durch Heizen, Kühlen, Be- und/oder Entfeuchten von Bedeutung. Diese Änderungen können rechnerisch auf der Grundlage der beschriebenen Beziehungen analysiert werden.

Für die praktische und ingenieurtechnische Anwendung bietet das Mollier-h,x-Diagramm die Möglichkeit, diese Prozesse schnell und übersichtlich in grafischer Form darzustellen und somit ein Grundverständnis über die ablaufenden Prozesse zu gewinnen.

Für die Darstellung wird eine spezielle Form des Mollier-h,x-Diagramms verwendet. Dieses ist auf die wesentlichen Informationen konkret auf die Zustandsänderung und den Wertebereich reduziert. Dadurch bleibt der Überblick gewahrt.

Für die spätere konkrete Nutzung sollte auf das h,x-Diagramm in der hinteren Einstecktasche zurückgegriffen werden.

Im Mollier-h,x-Diagramm sind die Größen Enthalpie h und Feuchtegehalt x auf die trockene Luft bezogen. Konkret bedeutet das einen Bezug auf eine Masse der trockenen Luft von 1 kg. Daher ist die Darstellung der Zustandsänderung unabhängig von dem Luftmassenstrom $\dot{m}_{L,tr}$. Die Umrechnung auf Wärmeströme oder Wasserdampfmassenströme hat in einem separaten Schritt zu erfolgen.

2.1 Heizen

Das Erwärmen (Heizen) von Luft ist eine Zustandsänderung, die auf einer Isotache bei $x = \text{konst.}$ erfolgt, d. h. der Feuchtegehalt x bleibt konstant.

Als Wärmequellen kommen sowohl technische Geräte (Beispiele siehe Abb. 2.1-2 und Abb. 2.1-3), die im Folgenden als **Heizer** bezeichnet werden, wärmeabgebende Flächen, Kompressionswärme beim Ventilator als auch die von Menschen und Tiere abgegebene Wärme infrage.

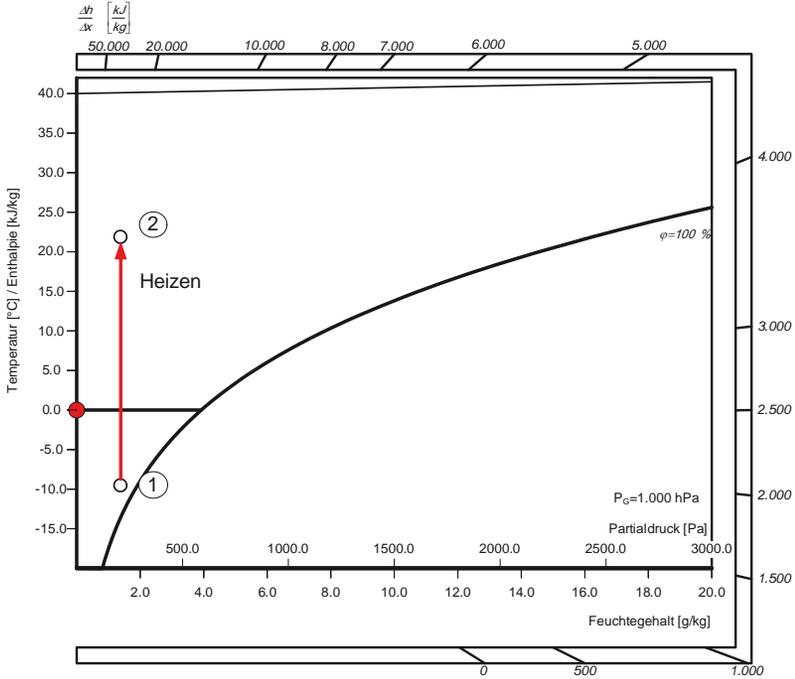


Abb. 2.1-1 Schematischer Zustandsverlauf beim Erwärmen (Heizen) eines Luftzustands 1 zum Luftzustand 2

Beim Erwärmen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2 ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Veränderliche Größen	Konstante Größen
Temperatur t (steigt) \uparrow relative Feuchte φ (sinkt) \downarrow spezifische Enthalpie h (steigt) \uparrow Rohdichte der Luft ρ_L (sinkt) \downarrow	Feuchtegehalt x

Das bedeutet:

Mit dem Erwärmen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2 ist die Luft in der Lage, mehr Wasserdampf (Feuchtigkeit) aufzunehmen.

Die notwendige Heizleistung \dot{Q}_{LH} , um die Erwärmung der Luft vom Zustand 1 auf den Zustand 2 zu realisieren, ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_{L,tr} \cdot \Delta h = \dot{m}_{L,tr} \cdot (h_2 - h_1) \text{ bzw.} \quad (2-1)$$

$$\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_{L,tr} \cdot c_{p,L} \cdot \Delta t = \dot{m}_{L,tr} \cdot c_{p,L} \cdot (t_2 - t_1) \quad (2-2)$$

Zu beachten ist:

Nur beim Erwärmen (Heizen) darf die Heizleistung mit der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,L}$ berechnet werden. Die Definition der Enthalpie der feuchten Luft

$$h = c_{p,L} \cdot t + x \cdot (\Delta h_V + c_{p,D} \cdot t)$$

nach Gleichung (1-27) zeigt jedoch, dass es sich bei dieser Festlegung um eine Näherung handelt. Der Anteil des Wasserdampfs ($x \cdot c_{p,L} \cdot t$) wird dabei vernachlässigt. Für technische Prozesse ist diese Vorgehensweise akzeptabel. Bei allen anderen Prozessen (Zustandsänderungen), bei denen eine Veränderung des Feuchtegehalts x zu erwarten ist, muss zwingend die spezifische Enthalpie h verwendet werden.

Generell ist für alle Zustandsänderungen zu empfehlen, mit der spezifischen Enthalpie h zu arbeiten.

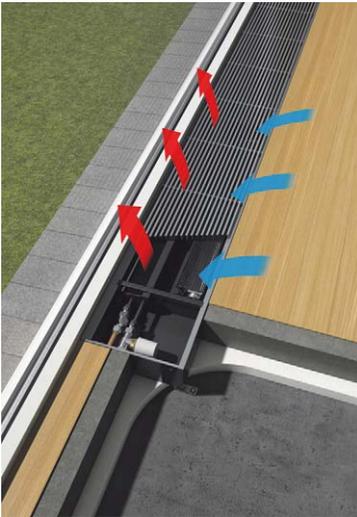


Abb. 2.1-2 Fußbodendurchlass, Konvektor (Wirkprinzip) (Werkbild Fa. EMCO)



Abb. 2.1-3 Lamellenwärmeübertrager, (Werkbild Fa. Howatherm)

Beispiel 2.1-1:

gegeben:

Luftzustand 1:

$$t_1 = -5 \text{ °C}; \quad x_1 = 2 \text{ g/kg} \quad p_G = 1.000 \text{ hPa}$$

Aus dem h,x-Diagramm sind folgende Informationen abzulesen:

- Der Zustandspunkt 1 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Isotache $x_1 = 2 \text{ g/kg}$ mit der Isothermenlinie von $t_1 = -5 \text{ °C}$
- Der Wert der Isenthalpe $h_{L,1}$ des Zustands 1 ist der Schnittpunkt mit der Ordinate bei deren Verlängerung bis zur Ordinate.
- Die relative Feuchte ergibt sich aus dem entsprechenden Wert einer Linie $\varphi = \text{konst.}$ die durch den Zustandspunkt 1 geht.
- Der Wert der Rohdichte ρ_1 liegt zwischen den Linien konstanter Rohdichte $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Der Wert ist über das Streckenverhältnis der beiden Strecken $1,3 - 1,25 / 1,3 - \rho_1$ zu ermitteln.

$$\varphi_1 = 80 \% ; h_{L,1} = 0 \text{ kJ/kg} ; \rho_1 = 1,295 \text{ kg/m}^3$$

gesucht:

Der Zustand 2 ergibt sich nach dem Erwärmen auf eine Temperatur $t_2 = 25 \text{ °C}$. Für den Zustand 2 sind die Zustandsgrößen h , φ und ρ aus dem h,x -Diagramm ablesen. Die Heizleistung ist für einen Massestrom der trockenen Luft von $\dot{m}_{L,tr} = 1 \text{ kg/s}$ zu berechnen:

- Der Zustandspunkt 2 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Isotache $x_1 = x_2 = 2 \text{ g/kg}$ mit der Isothermenlinie von $t_2 = 25 \text{ °C}$
- Der Wert der Isenthalpe $h_{L,2}$ des Zustandes 2 ist der Schnittpunkt mit der Ordinate
- Die relative Feuchte ergibt sich aus dem entsprechenden Wert einer Linie $\varphi = \text{konst.}$, die durch den Zustandspunkt 2 geht
- Der Wert der Dichte ρ liegt zwischen den eingezeichneten Linien konstanter Rohdichte $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$. Der Wert ist über das Streckenverhältnis der beiden Strecken $1,2 - 1,15 / 1,2 - \rho$ zu ermitteln

$$h_{L,2} = 30 \text{ kJ/kg} ; \varphi = 10 \% ; \rho = 1,167 \text{ kg/m}^3$$

- Spezifische Heizenergie: $\Delta h = h_{L,2} - h_{L,1} = 30 - 0 = 30 \text{ kJ/kg}$
- Heizleistung: $\dot{Q}_{LH} = \dot{m}_{L,tr} \cdot \Delta h = 1 \cdot 30 = 30 \text{ kJ/s} = 30 \text{ kW}$

$$h_{L,2} = h_{L,1} + \dot{Q}_{LH} / \dot{V}_f \cdot \rho_1 = 28 \text{ kJ/kg} + 500 \text{ W} / (100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,193 \text{ kg/m}^3) = 28 + 500 \text{ Wh} / 119,1 \text{ kg} = 28 + 500 \cdot 3,6 \cdot 10^3 / 119,1 = 28 + 15,1 = 43,1 \text{ kJ/kg}$$

$$t_2 = 33 \text{ }^\circ\text{C}; \varphi_2 = 12 \%; \rho_2 = 1,136 \text{ kg/m}^3$$

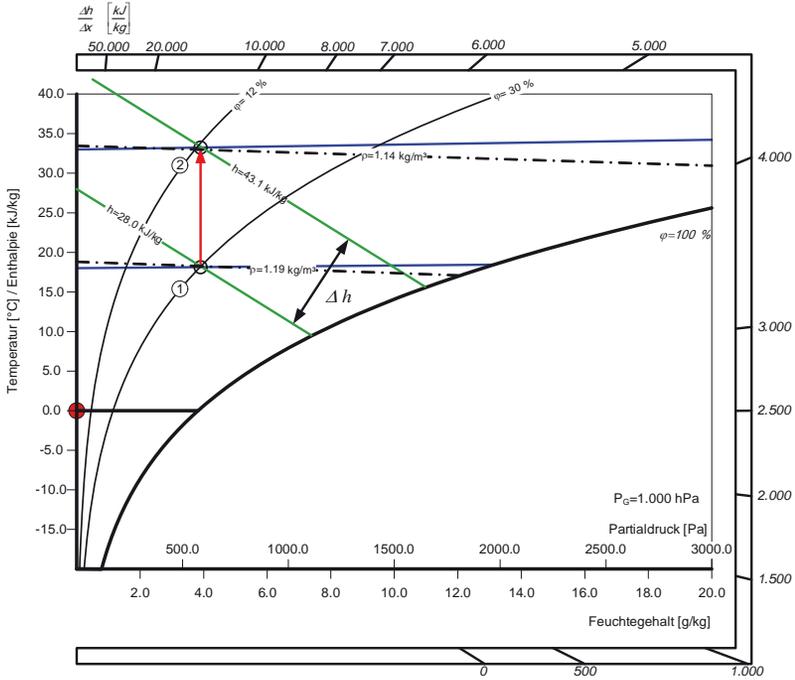


Abb. 2.1-5 Schematischer Zustandsverlauf für Beispiel 2.1.-2

2.2 Trockenes Kühlen (ohne Taupunkt- unterschreitung)

Das trockene Kühlen von Luft ist eine Zustandsänderung, die auf einer Isotache bei $x = \text{konst.}$ erfolgt, d. h. der Feuchtegehalt x bleibt konstant.

Als Wärmesenken kommen sowohl technische Geräte (Beispiele siehe Abbildungen 2.1-2 und 2.1-3)), die im Folgenden als **Kühler** bezeichnet werden, als auch kühle Flächen (z. B. Kühldecken oder kalte Fensterflächen bei denen die Oberflächentemperatur t_o unter der Temperatur der Umgebung liegt) infrage.

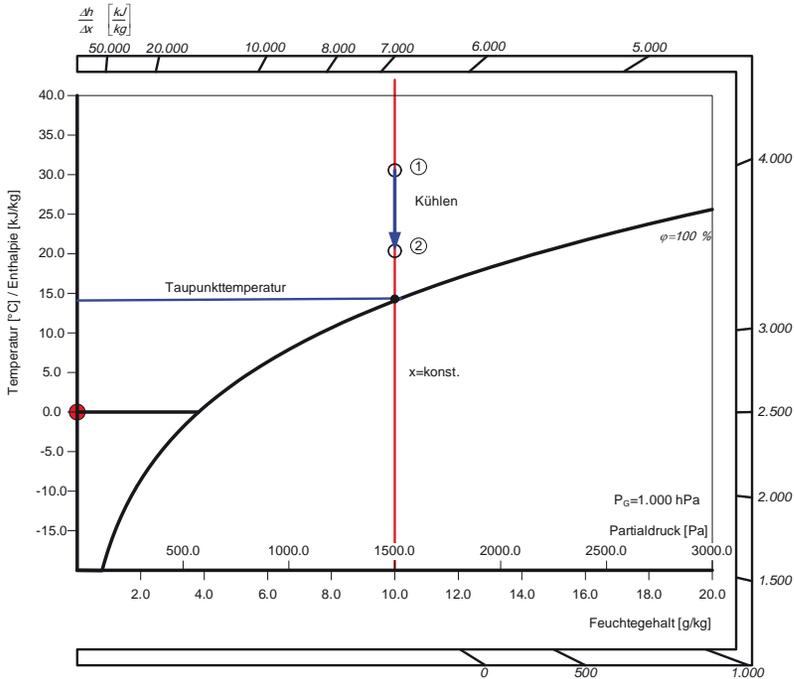


Abb. 2.2-1 Schematischer Zustandsverlauf beim trockenen Kühlen eines Luftzustands 1 zum Luftzustand 2

Beim trockenen Kühlen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2 ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Veränderliche Größen	Konstante Größen
Temperatur t (sinkt) ↓ relative Feuchte (steigt) ↑ spezifische Enthalpie h (sinkt) ↓ Dichte der Luft ρ (steigt) ↑	Feuchtegehalt x

Das bedeutet:

Mit dem trockenen Kühlen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2 kann die Luft weniger Wasserdampf (Feuchtigkeit) aufnehmen.

Die Kühlleistung \dot{Q}_{LK} ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{LK} = \dot{m}_{L,tr} \cdot \Delta h = \dot{m}_{L,tr} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2-3)$$

Beispiel 2.2-1:

gegeben:

Luftzustand 1:

$$t_1 = 32 \text{ °C}; \varphi_1 = 40 \% \quad p_G = 1.000 \text{ hPa}$$

Aus dem h,x-Diagramm sind folgende Informationen abzulesen:

- Der Zustandspunkt 1 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Linie $\varphi = 40 \%$ mit der Isothermenlinie von $t_1 = 32 \text{ °C}$.
- Der Wert der Isenthalpe $h_{L,1}$ des Zustandes 1 ist der Schnittpunkt mit der Ordinate.
- Der Feuchtegehalt x_1 ergibt sich aus der Verlängerung der Isotache des Zustandspunkts 1 zur Abszisse.
- Der Wert der Rohdichte ρ_1 liegt zwischen den eingezeichneten Linien konstanter Rohdichte $\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 1,10 \text{ kg/m}^3$. Der Wert ist über das Streckenverhältnis der beiden Strecken $1,15 - 1,10 / 1,15 - \rho_1$ zu ermitteln.

$$x_1 = 12 \text{ g/kg}; h_{L,1} = 63 \text{ kJ/kg}; \rho_1 = 1,13 \text{ kg/m}^3$$

gesucht:

Der Zustand 2 ergibt sich nach dem Abkühlen auf eine Temperatur $t_2 = 18,2 \text{ °C}$. Für den Zustand 2 sind die Zustandsgrößen h , φ und ρ aus dem h,x-Diagramm ablesen. Die Kühlleistung ist für einen Massestrom der trockenen Luft von $\dot{m}_{L,tr} = 1 \text{ kg/s}$ zu berechnen:

- Der Zustandspunkt 2 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Isotache $x_1 = x_2 = 12 \text{ g/kg}$ = konstant mit der Isothermenlinie von $t_2 = 18,2 \text{ °C}$.
- Der Wert der Isenthalpe $h_{L,2}$ des Zustands 2 ist der Schnittpunkt mit der Ordinate.
- Die relative Feuchte ergibt sich aus dem entsprechenden Wert einer Linie $\varphi = \text{konst.}$ die durch den Zustandspunkt 2 geht.
- Der Wert der Rohdichte ρ_2 liegt zwischen den Linien konstanter Rohdichte $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$. Der Wert ist über das Streckenverhältnis der beiden Strecken $1,2 - 1,15 / 1,2 - \rho_2$ zu ermitteln.

$$h_{L,2} = 48,5 \text{ kJ/kg}; \varphi = 90 \% ; \rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

- Spezifische Kühlenergie: $\Delta h = h_{L,2} - h_{L,1} = 63 - 48,5 = 14,5 \text{ kJ/kg}$
- Kühlleistung: $\dot{Q}_{LK} = \dot{m}_{L,tr} \cdot \Delta h = 1 \cdot 14,5 = 14,5 \text{ kJ/s} = 14,5 \text{ kW}$

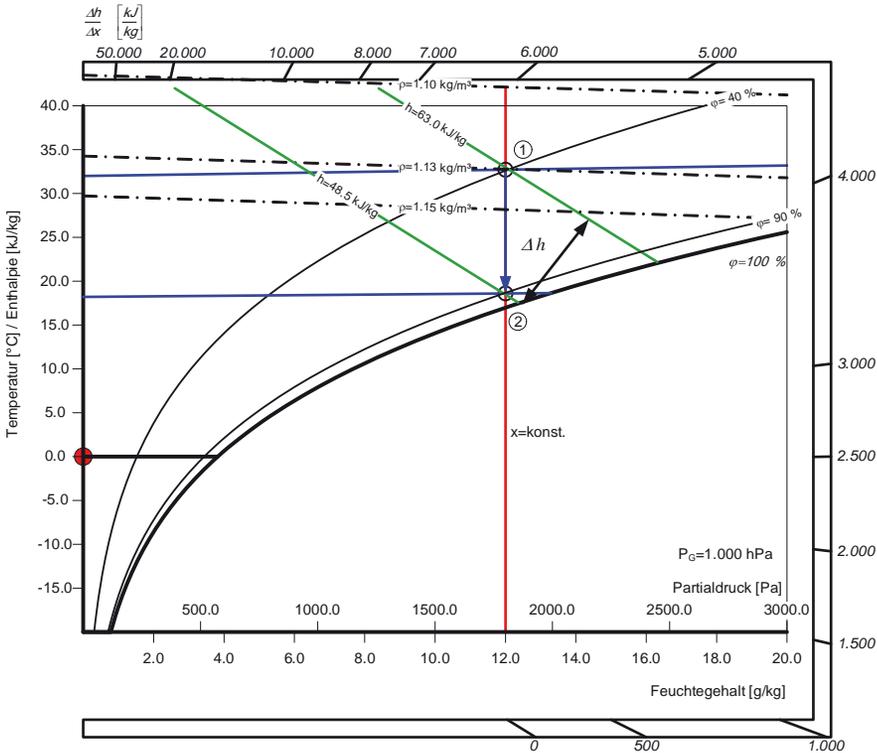


Abb. 2.2-2 Schematischer Zustandsverlauf für Beispiel 2.2.-1

Beispiel 2.2-2:
gegeben:

In einem Raum mit einer Raumtemperatur von $t_1 = 26 \text{ °C}$, $\varphi_1 = 40 \%$ befindet sich ein Fußbodenkonvektor mit einer Kühlleistung von 400 W . Der geförderte Luftvolumenstrom beträgt $\dot{V}_f = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einem Gesamtdruck $p_G = 1.000 \text{ hPa}$. Der Anteil $(1+x)$ aus Gleichung (1-25) soll vernachlässigt werden, sodass $\dot{m}_{L,tr} = \dot{m}_f$.

$$\Delta h = \dot{Q}_{KL} / \dot{m}_{L,tr}$$

$$x_1 = 8,5 \text{ g/kg}; \rho_1 = 1,16 \text{ kg/m}^3; h_{L,1} = 47,5 \text{ kJ/kg}$$

gesucht:

Welche Temperatur t_2 ergibt sich als Austrittstemperatur aus dem Fußbodenkonvektor? Für den Zustand 2 sind die Zustandsgrößen x_2 , φ_2 , ρ_2 und $h_{L,2}$ aus dem h,x -Diagramm abzulesen.