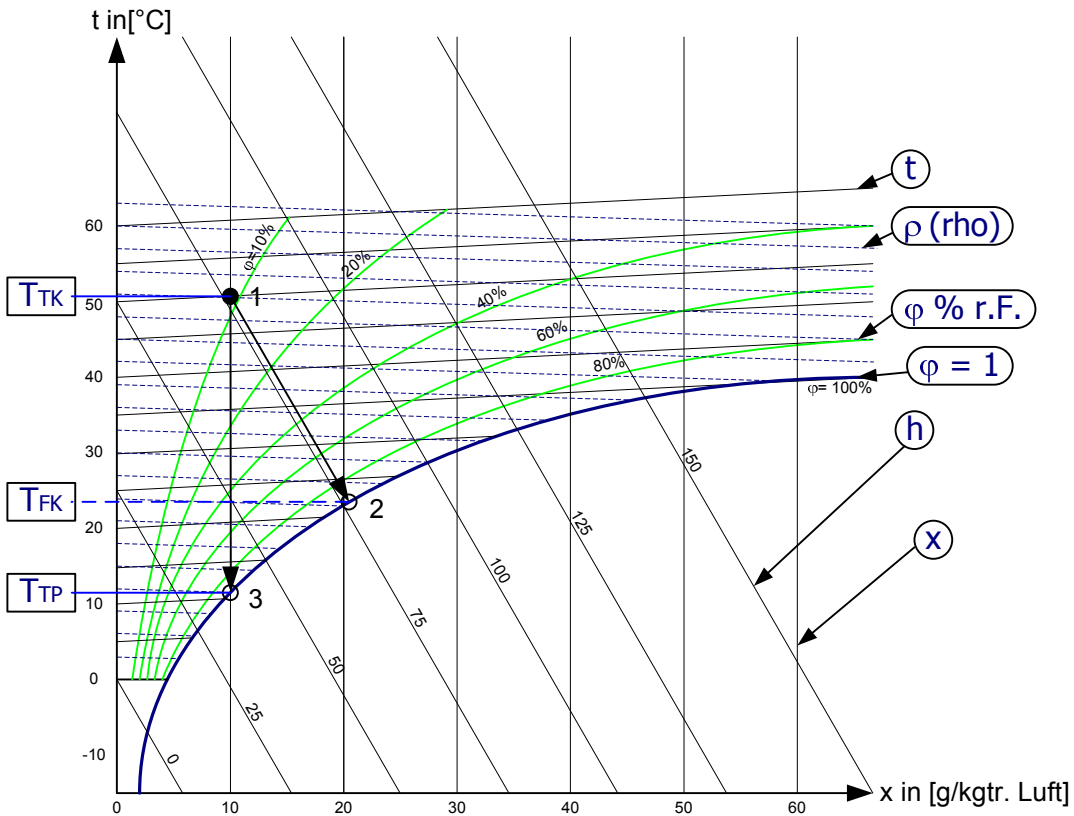


Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

A Aufbau



t = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

ρ = Dichte der Luft in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

x = absoluter Wassergehalt in $[\text{g}/\text{kg}]$

h = Enthalpie (Wärmeinhalt) in $[\text{kJ}/\text{kg}]$

ϕ = relative Luftfeuchtigkeit in $[\% \text{ r.F.}]$

$\phi=1$ = Sättigungslinie (Grenzlinie; Nebellinie) (**100%** mit Wasser gesättigte Luft)

TTr = Trockenkugeltemperatur („normale“ Temperatur der Luft in $^{\circ}\text{C}$)

TFK = Feuchtkugeltemperatur (Temperatur entlang der „h“-Linie (Enthalpielinie) bis zur $\phi=1$ -Linie, die einer bestimmten Trockenkugeltemperatur zugehörig ist in $^{\circ}\text{C}$) **1** \rightarrow **2**

TTP = Taupunkttemperatur (Temperatur entlang der x-Linie bis zur $\phi=1$ -Linie, die einer bestimmten Trockenkugeltemperatur zugehörig ist in $^{\circ}\text{C}$). Unterhalb der $\phi=1$ -Linie scheidet sich Wasser aus! **1** \rightarrow **3**

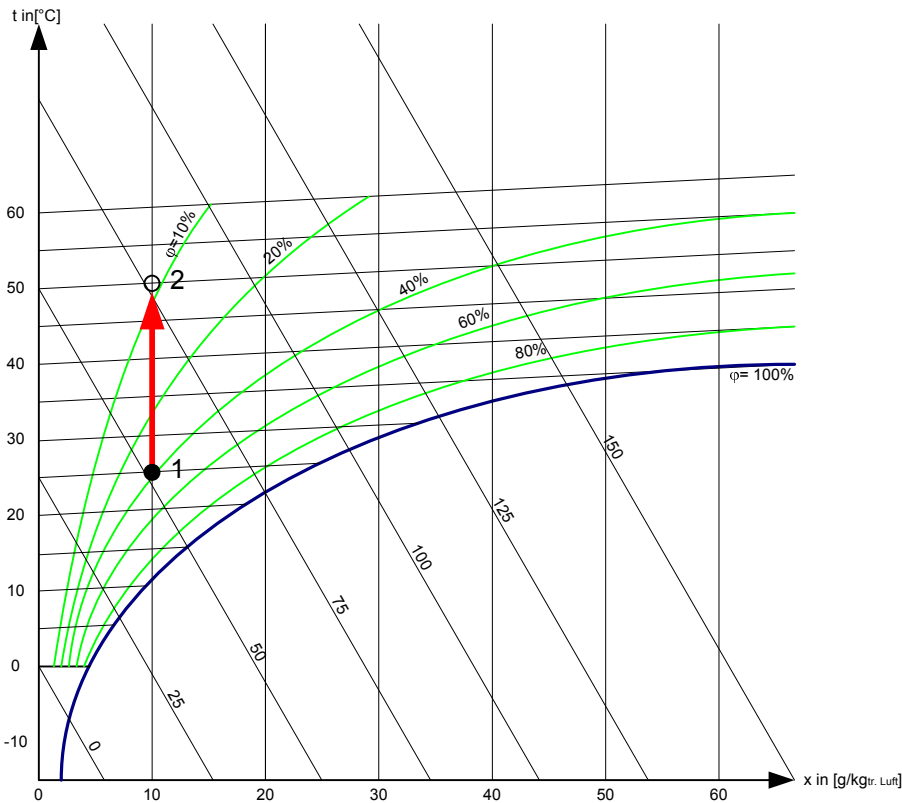
Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

B Zustandsänderungen im h-x- Diagramm

- 1. sensible Erhitzung**
- 2. sensible (trockene Kühlung)**
- 3. Kühlung und Entfeuchtung (sensibel + latent)**
- 4. Befeuchtung und Kühlung durch Verdunstung mit Wasser**
- 5. Befeuchtung mit Sattdampf**
- 6. Mischung von Luftströmen**

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

1 Aufheizen/erwärmen

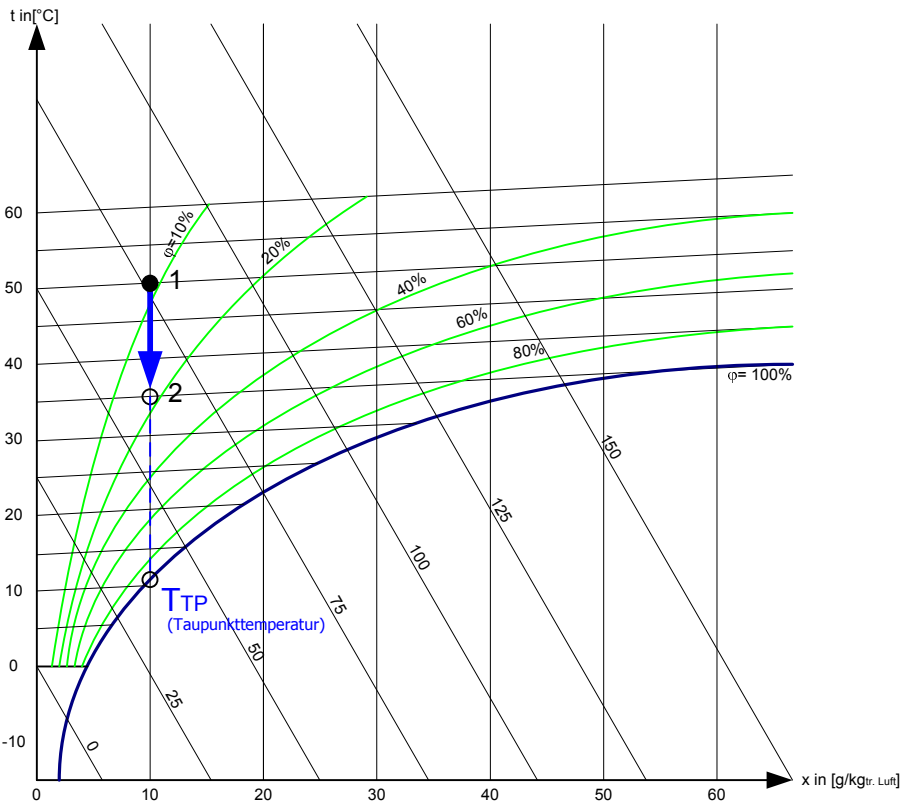


Bei Wärmezufuhr an die Luft **erwärmt** sich diese bei **konstanter Feuchte** (absolute Luftfeuchte x in [g/kg]). Die Erwärmung verläuft wie oben dargestellt senkrecht von unten (Zustandspunkt **1**) nach oben (Zustandspunkt **2**). Dies kann durch Erwärmung z.B. durch PWW*-Heizregister, Elektroheizung, Sonneneinwirkung etc. geschehen. Dabei bleibt der absolute Wassergehalt der Luft konstant, die relative Luftfeuchtigkeit nimmt ab. Die Dichte der Luft wird geringer und die Enthalpie nimmt zu.

* = **P**umpen-**W**arm-**W**asser

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

2 trockene (sensible) Kühlung



Bei Wärmeentzug aus der Luft **kühlt** sich diese bei **konstanter Feuchte** (absolute Luftfeuchte x in [g/kg]) ab. Die trockene Kühlung verläuft wie oben dargestellt senkrecht von oben (Zustandspunkt **1**) nach unten (Zustandspunkt **2**).

Dies kann durch Abkühlen z.B. durch PKW*-Kühlregister (Kaltwassersatz) oder Direktverdampfung (z.B. Kältemittel R407C) geschehen. Dabei bleibt der absolute Wassergehalt der Luft konstant, die relative Luftfeuchtigkeit nimmt zu. Außerdem wird die Dichte der Luft größer und die Enthalpie nimmt ab.

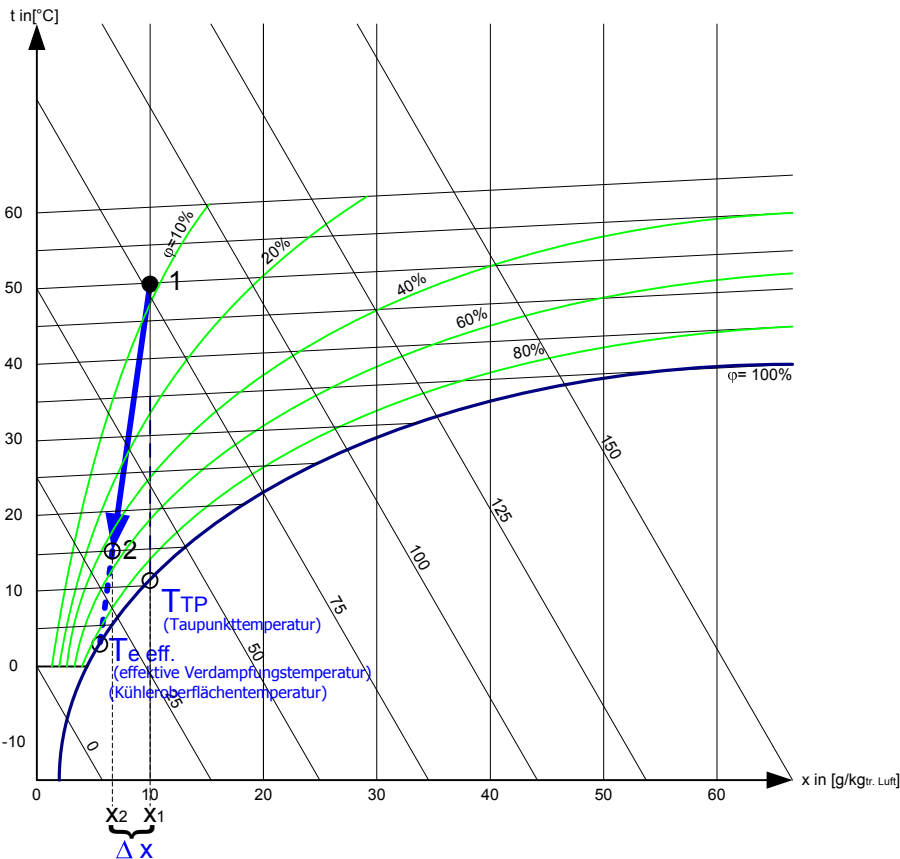
Die Temperatur kann maximal bis zur $\varphi=100\%$ -Linie gesenkt werden, ohne dass sich Wasser aus der Luft ausscheidet. Dazu muß die Oberflächentemperatur des Luftkühlers oberhalb der **Taupunkttemperatur** liegen. Diese ist im Schnittpunkt mit der Sättigungslinie ($\varphi=100\%$) bei der sich Wasser aus der Luft ausscheidet.

Wird die Taupunkttemperatur nicht unterschritten spricht man von trockener Kühlung.

* = **P**umpen-**K**alt-**W**asser

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

3 nasse (sensible und latente) Kühlung bzw. Entfeuchtung



Bei Wärmeentzug aus der Luft **kühlt** sich diese bis auf eine bestimmte, neue Temperatur ab.

Wird dabei die **Taupunkttemperatur** der Luft an der **Oberfläche des Kühlers** unterschritten, scheidet sich entsprechend viel Wasser aus der Luft aus (Δx). Die nasse Kühlung verläuft wie oben dargestellt senkrecht von oben (Zustandspunkt **1**) nach unten und links Zustandspunkt **2**).

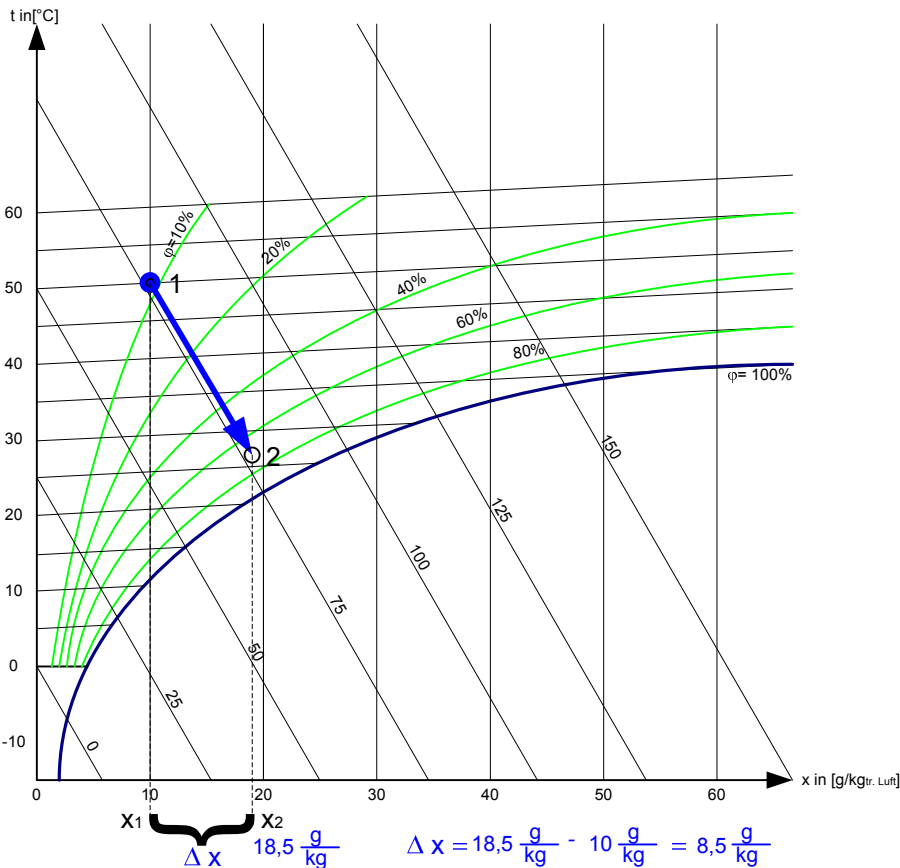
Dies kann durch Abkühlen z.B. durch PKW*-Kühlregister (Kaltwassersatz) oder Direktverdampfung (z.B. Kältemittel R407C) geschehen.

Dabei verringert sich der absolute Wassergehalt der Luft und die relative Luftfeuchtigkeit nimmt ab. Außerdem wird die Dichte der Luft größer und die Enthalpie nimmt ab.

Durch das Ausscheiden von Wasser aus der Luft spricht man von "nasser Kühlung".

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

4 Befeuchtung/Kühlung mit Wasser (adiabate Kühlung)



Bei der Befeuchtung von Luft mit Wasser **befeuchten und kühlen** wir diese bis auf einen bestimmten, neuen Luftzustand. Es ändern sich auch die Dichte (nimmt zu), die relative Feuchte (nimmt zu) und der absolute Wassergehalt (nimmt zu) der Luft.

Nur die **Enthalpie bleibt konstant**.

Dabei ist zur Bestimmung des neuen Luftzustandes die zugeführte Wassermenge entscheidend.

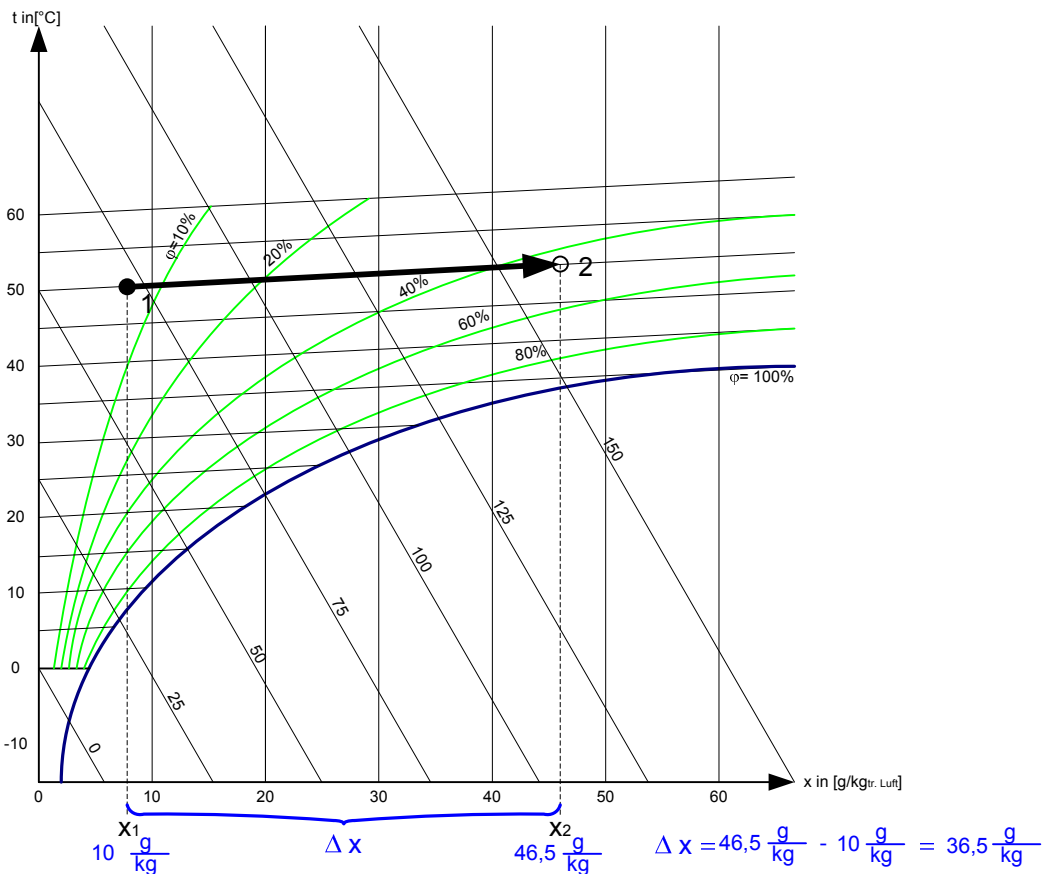
Die Befeuchtung mit Wasser verläuft wie oben dargestellt senkrecht von oben (Zustandspunkt **1**) nach unten und rechts (Zustandspunkt **2**).

Entscheidend ist bei dieser Art der Befeuchtung, die Zuführung von gesättigter Flüssigkeit (reines Wasser).

Erreicht wird dies z.B. durch Zerstäuberdüsen oder Wäscherkammern. Man nennt diese Art der Befeuchtung auch **adiabate Zustandsänderung** oder **adiabate Kühlung**.

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

5 Befeuchtung mit Sattdampf



Bei der Befeuchtung von Luft mit Sattdampf **befeuchten** wir diese bis auf einen bestimmten, neuen Luftzustand. Es ändern sich auch die Dichte (geringe Zunahme), die relative Feuchte (nimmt zu), die Enthalpie und der absolute Wassergehalt der Luft (nimmt zu).

Nur die **Temperatur bleibt konstant**.

Dabei ist zur Bestimmung des neuen Luftzustandes die zugeführte Sattdampfmenge entscheidend.

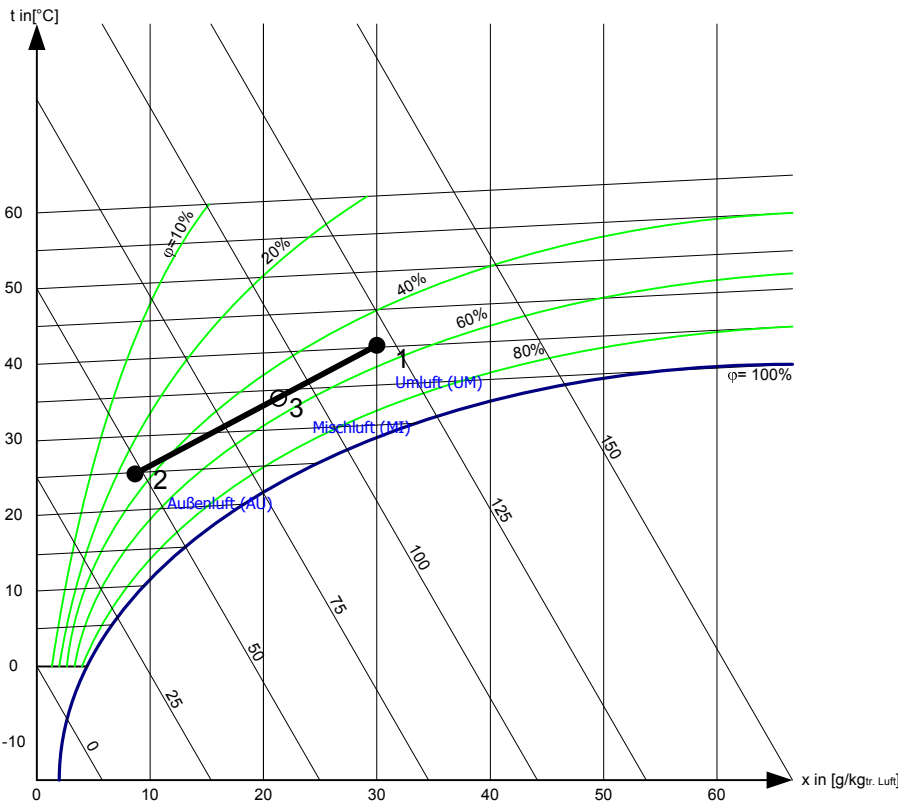
Die Befeuchtung verläuft wie oben dargestellt waagrecht von links (Zustandspunkt **1**) nach rechts (Zustandspunkt **2**).

Entscheidend ist bei dieser Art der Befeuchtung, die Zuführung von **gesättigtem Dampf** (reiner Dampf von 100°C, nicht überhitzt) .

Erreicht wird dies z.B. durch Dampfzylinder oder Verdunstungsschalen mit Heizung. Man nennt diese Art der Befeuchtung auch **Dampfbefeuchtung**.

Das h-x-Diagramm: Aufbau und Anwendungen

6 Mischung von Luftströmen



Bei Mischung von zwei Luftständen **kühlen bzw. erwärmen** sich diese bis auf einen bestimmten, neuen Misch-Luftzustand ab bzw. auf. Es ändern sich auch alle anderen physikalischen Größen.

Dabei ist zur Bestimmung des neuen Luftstandes die jeweilige Luftmenge und die Temperaturdifferenz entscheidend.

Die Mischung von Luftströmen verläuft wie oben dargestellt senkrecht von oben (Zustandspunkt **1**) nach unten und links (Zustandspunkt **3**) bzw. von unten (Zustandspunkt **2**) nach oben rechts (Zustandspunkt **3**).

Der Punkt 3 liegt entsprechend abhängig von den Luftmengen (V) und Differenzen (ΔT) näher am Zustand **1** oder Zustand **2**.

Erreicht wird dies durch Mischen der aus dem Raum abgesaugten Umluft (**UM**) mit der Außenluft (**AU**). Der neue Luftzustand wird als Mischluft (**MI**) bezeichnet.

Der Punkt **3** auf der Verbindungslinie **1 - 2** kann rechnerisch oder zeichnerisch ermittelt werden.

Rechnerische Ermittlung des Mischpunktes:

$$t_{MI} = \frac{\dot{V}_{UM} * t_{UM} + \dot{V}_{AU} * t_{AU}}{\dot{V}_{AU} + \dot{V}_{UM}}$$

\dot{V}_{UM} = Volumenstrom Umluft
 \dot{V}_{AU} = Volumenstrom Außenluft
 t_{UM} = Umluft-Temperatur
 t_{AU} = Außenluft-Temperatur
 t_{MI} = Mischlufttemperatur

Im Regelfall wird die Berechnung aus Gründen der Genauigkeit mit dem Massenstrom m in [kg/s] durchgeführt, da die Luft bei den möglichen unterschiedlichen Temperaturen eine andere Dichte aufweist. Zur Vereinfachung sind hier die Volumenströme in [m³/s] eingesetzt. Temperaturen idealerweise immer in [K].

Das h-x-Diagramm

