

Mischung von Luft

$$\vartheta_M = \frac{\dot{m}_1 \times \vartheta_1 + \dot{m}_2 \times \vartheta_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_M = \frac{\dot{V}_1 \times \rho_1 \times \vartheta_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2 \times \vartheta_2}{\dot{V}_1 \times \rho_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_M = \frac{\dot{m}_1 \times h_1 + \dot{m}_2 \times h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \text{ kJ/kg}$$

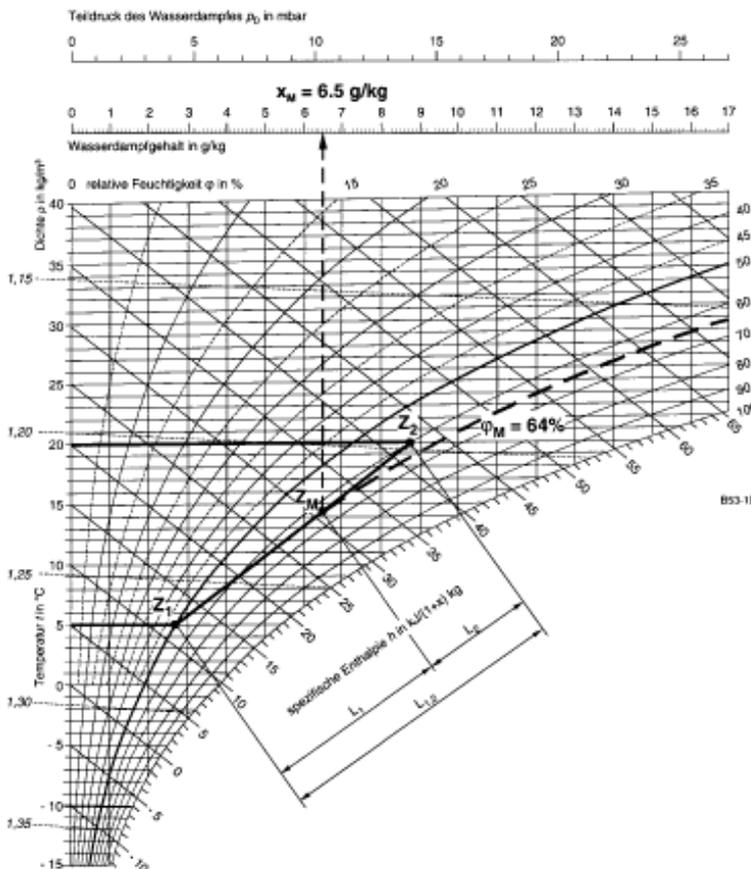
$$h_M = \frac{\dot{V}_1 \times \rho_1 \times h_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2 \times h_2}{\dot{V}_1 \times \rho_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2} \text{ kJ/kg}$$

$$x_M = \frac{\dot{m}_1 \times x_1 + \dot{m}_2 \times x_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \text{ g/kg}$$

$$x_M = \frac{\dot{V}_1 \times \rho_1 \times x_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2 \times x_2}{\dot{V}_1 \times \rho_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2} \text{ g/kg}$$

Im h, x Diagramm werden die zwei Luftzustände mit einer Linie verbunden. Der Mischpunkt liegt auf der Verbindungslinie. Dabei liegt der Mischpunkt näher bei Luftzustand mit dem größeren Volumenstrom. Zu Berechnung werden die Volumenströme zusammengezählt. Die Länge der Verbindungslinie wird durch den Volumenstrom geteilt. Und mit einer Einzelluftmenge multipliziert.

Zum Beispiel:



Außenluft: 1500 m<sup>3</sup>/h  
Umluft: 3000 m<sup>3</sup>/h  
Daraus ergibt sich eine  
Gesamtluftmenge  
von 4500 m<sup>3</sup>/h.

Wenn jetzt die Verbindungslinie  
10 cm lang ist,  
heißt dies:  
10 cm / 4500 m<sup>3</sup>/h × 3000 m<sup>3</sup>/h  
= 6,66 cm

Also es werden 6,66 cm von Richtung  
Außenluft zur Umluft abgetragen.  
Damit ist der Mischpunkt näher bei  
der höheren Luftmenge. Umluft

Aus dem Diagramm können die  
Werte abgelesen werden.

Zum Weiterrechnen werden die Massen einzeln errechnet und zusammen gezählt. Dies ist die Grundlage aller weiteren Prozesse.

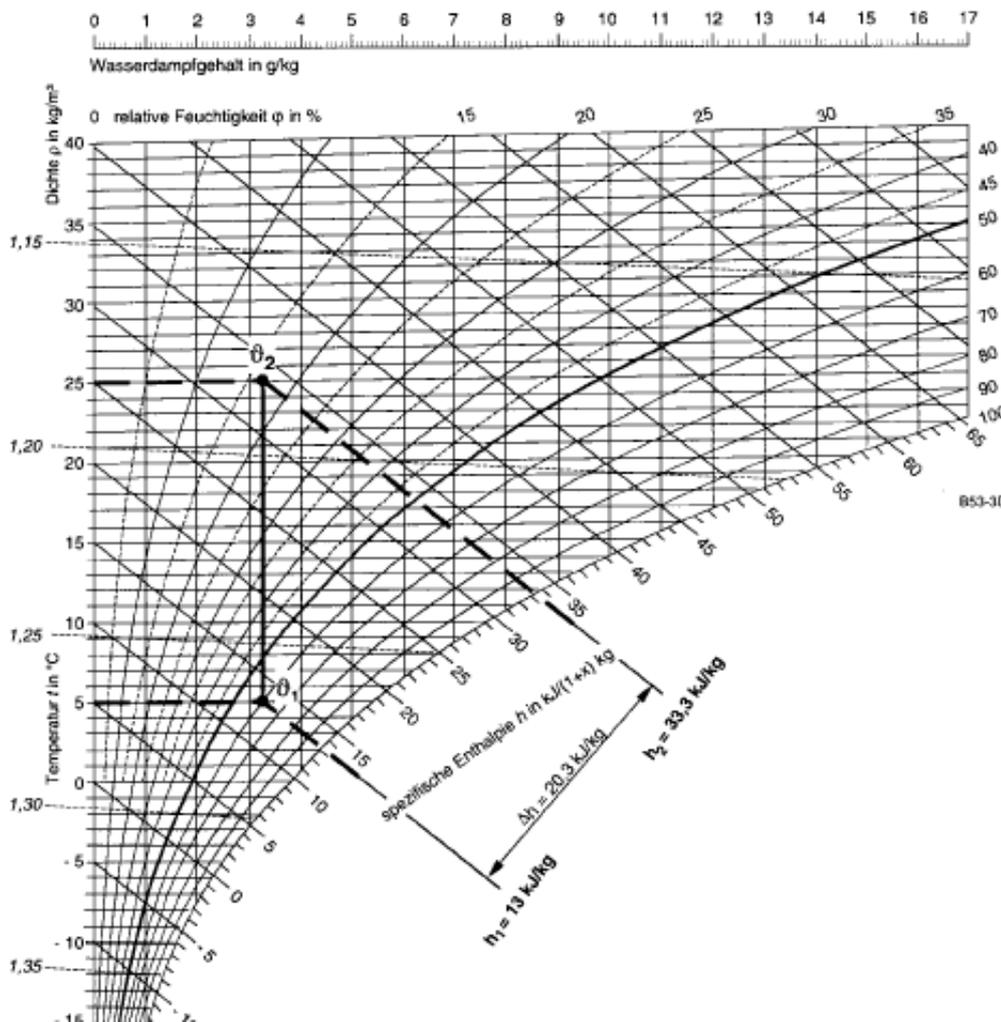
$$\dot{m}_g = \dot{V}_1 \times \rho_1 + \dot{V}_2 \times \rho_2 \text{ kg/h}$$

## Erwärmung

Im Diagramm verläuft die Zustandsänderung senkrecht nach oben. Die absolute Feuchte bleibt konstant.

$$\dot{Q}_H = m_L \times \Delta h$$

$$\dot{Q}_H = \dot{V} \times \rho_L \times (h_2 - h_1)$$



Beispiel

Gegeben:  
3600 kg/h  
Eingang 5°C 60 %  
Ausgang 25 °C

Ablesung:  
 $h_1 = 13 \text{ kJ/kg}$   
 $h_2 = 33,3 \text{ kJ/kg}$   
Relat. Feuchte 16%

Energiemenge zum  
Erwärmen

Lösung  
 $\dot{Q}_H = m_L \times (h_2 - h_1)$

$1 \text{ kg/s} \times (33,3 \text{ kJ/kg} - 13 \text{ kJ/kg}) =$   
 $20,3 \text{ kJ/s} = 20,3 \text{ kW}$

Heizwasserstrom

$$m_W = \frac{\dot{Q}_H}{4,19 \text{ kJ/kgK} \times (v_{VL} - v_{RL})}$$

$$\dot{Q}_H = \text{Heizleistung kJ/h} \quad m_W = \text{Volumenstrom kg/h}$$

$$\frac{20,3 \text{ kJ/s}}{4,19 \text{ kJ/kgK} \times (70^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})} = 0,242 \text{ kg/s} = 872 \text{ kg/h (gebräuchliche Angabe)}$$

Betriebscharakteristik = Aufwärmgrad

$$\Phi = \frac{v_a - v_e}{v_m - v_e}$$

$$v_m = \frac{v_{V1} - v_{R1}}{2} = \text{Mittlere Heizmitteltemperatur } ^\circ\text{C}$$

$v_A = \text{Luftaustritt Register } ^\circ\text{C}$

$v_E = \text{Lufteintritt Register } ^\circ\text{C}$

## Befeuchtung

Befeuchtet werden kann mit Wasser und mit Dampf.

Jedes h, x Diagramm hat einen Bezugspunkt. Zum leichter finden, wird mit einer Geraden der Anfangs- und der Endpunkt des  $\Delta h/\Delta x$  Randmaßstabes verbunden. Auf der Linie befindet sich der Bezugspunkt. Jetzt wird der Wärmeinhalt des Wassers /Dampfes ermittelt.

Berechnung bei Wasser

$t_w =$  Temperatur Wasser

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = c_w \times (t_w - t_0) = 4,19 \text{ kJ} \times (20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 83,8 \text{ kJ/kg}$$

## Dampftabelle

Für Dampf wird ein Wert von zirka 2680 kJ/kg ansetzt.

Druck absolut (bar)	Temperatur (°C)	Wärmeinhalt Wasser		Wärmeinhalt Dampf		Verdampfungswärme r	
		kJ/kg	W/kg	kJ/kg	W/kg	kJ/kg	W/kg
1,0	99,6	417,5	116	2675	743	2258	627
1,013	100	419,1	116,3	2676	743,3	2257	626,9
1,208	105	440,2	122,3	2684	745,6	2244	623,3
1,433	110	461,3	128,1	2691	747,5	2230	619,4
1,5	111,4	467,1	129,75	2693	748,1	2226	618,3
1,691	115	482,5	134,0	2690	747,2	2216	615,6
1,985	120	503,7	139,9	2706	751,7	2202	611,7
2,0	120,2	504,7	140,2	2706	751,7	2202	611,7
2,321	125	525	145,8	2713	753,6	2188	607,8
2,5	127,4	535,3	148,7	2716	754,4	2181	605,8
2,701	130	546,3	151,8	2720	755,6	2174	603,9
3,0	133,5	561,4	156,0	2725	757,0	2163	600,8
3,131	135	567,7	157,7	2727	757,5	2159	599,7
3,5	138,9	584,3	162,3	2732	758,9	2147	596,4
3,614	140	589,1	163,6	2733	759,2	2144	595,6
4,0	143,6	604,7	168,0	2738	760,6	2133	592,5
4,5	147,9	623,2	173,1	2743	762,0	2120	588,9
5,0	151,8	640,1	177,8	2748	763,3	2107	585,3

Jetzt wird der Wert am Randmaßstab gesucht und mit Bezugspunkt verbunden. Die Linie wird parallel zum Ausgangspunkt verschoben. Vom Zuluftpunkt zur senkrechten der Aufheizung. Der Schnittpunkt gibt an, wie weit die Luft erwärmt werden muß, damit nach der Befeuchtung der Zuluftzustand erreicht wird.

Rechnerisch kann auch der neue Luftzustand auch gefunden werden.

Wird nun 1 kg Luft mit 6 g Dampf befeuchtet steigt die Enthalpie wie folgt.

$$\Delta h = \Delta x \times h_D = 0,006 \times 2676 = 16,1 \text{ kJ/kg}$$

Handelt es sich um Wasser mit 20°C

$$\Delta h = \Delta x \times h_w = 0,006 \times (20 \times 4,19) = 0,5 \text{ kJ/kg}$$

Wir kennen den neuen x - Gehalt und die Enthalpie Linie. Der Schnittpunkt ergibt den neuen Luftzustand.

Zu wissen ist die Enthalpie Linie 0 geht bei 0 Grad und 0 % Luftfeuchtigkeit los.

**Isenthalp** ist ein Begriff der Thermodynamik. Er beschreibt eine Zustandsänderung, bei der die Enthalpie konstant bleibt. Nach der Zustandsgleichung eines idealen Gases gilt.

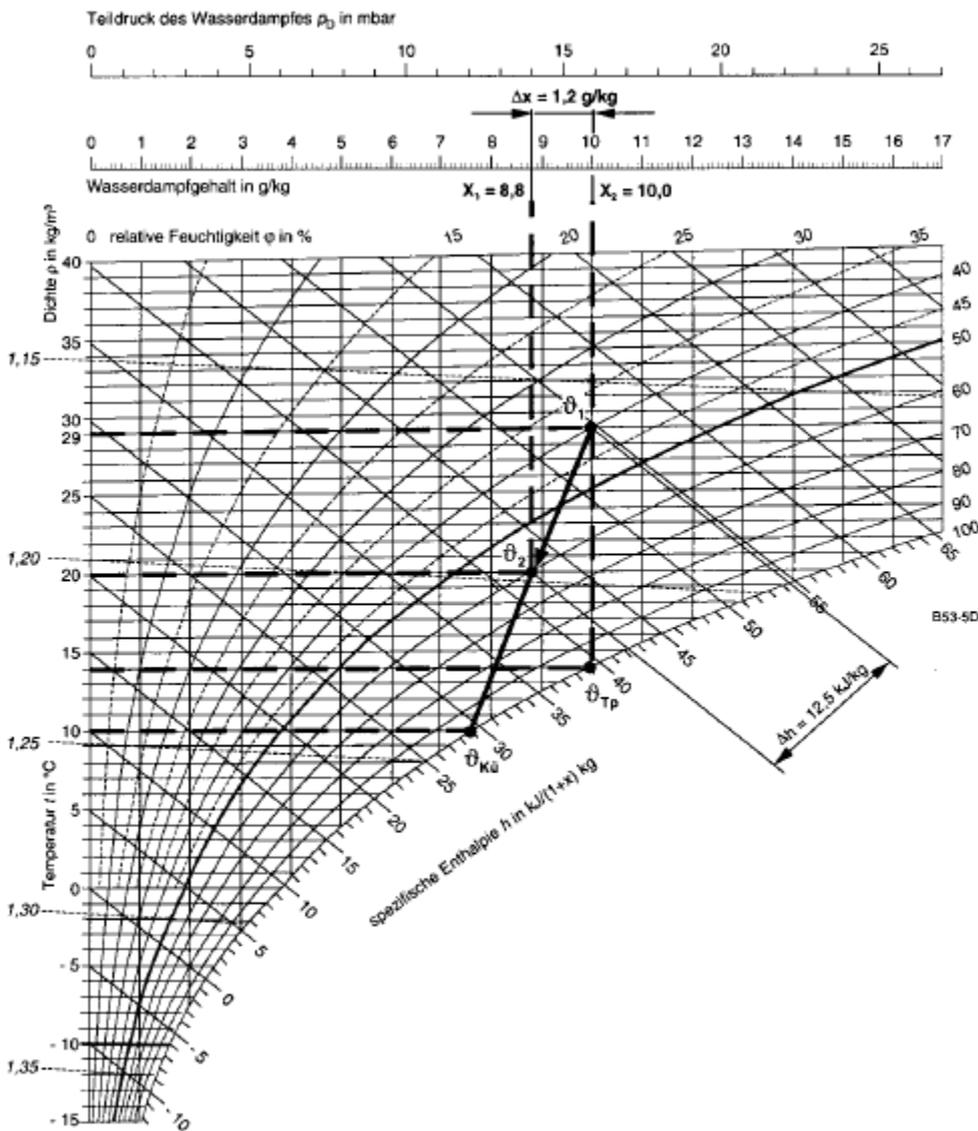
## Kühlung mit Entfeuchtung

Die Kühlflächentemperatur ist abhängig von der Bauart des Registers. Sie liegt im Allgemeinen 1 bis 2 K höher als die mittlere Kühlwasser- Vor und Rücklaufemperatur.

$$v_{\text{Kü}} = \frac{v_{\text{VL}} + v_{\text{RL}}}{2} + 1 \dots 2 \text{ (K)}$$

Liegt die Luftausgangszustand über den Taupunkt der Kühlfläche wird entfeuchtet.

Es wird der Lufteingangszustand mit der Kühlflächentemperatur auf der 100 % Feuchtlinie verbunden.



Soll nun die Luft auf 20 K abkühlt werden. Wir angenommen das, der Schnittpunkt dem Luftausgangszustand entspricht.

Eingang 29°C 40 %  
Enthalpie 54,7 kJ/kg;  
Feuchte 10g/kg

Fig. 3-5 Kühlen mit Wasserausscheidung

Kühlflächentemperatur 10° C ( VL 6 °C , RL 12°C, Korrekturwert 2°C)  
Gewünschte Ausgangstemperatur 20°C

Ergebnis durch Ablesung: Ausgang 20°C 60 %; Enthalpie 42,2 kJ/kg; Feuchte 8,8g/kg

Zu bemerken ist das Kühlflächentemperatur 2 – 3°C unter der Ausgangstemperatur liegen muß. Dies kann am besten durch das Anlegen eines Lineals überprüft werden. In unserem Beispiel liegt die Kühlflächentemperatur 10°C unter der Ausgangstemperatur.

### Ermittlung der Kühlleistung:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad 54,7 - 42,2 = 12,5 \text{ kJ/kg}$$

Bei einem Volumenstrom von 1 kg/s ergibt sich eine Kühlleistung von:

$$Q_{\text{Kü}} = \dot{m}_L \times \Delta h \quad 1 \text{ kg/s} \times 12,5 \text{ kJ/kg} = 12,5 \text{ kJ/s} = 12,5 \text{ KW}$$

$$Q_{\text{Kü}} = \rho_L \times \dot{V} \times \Delta h$$

### Ermittlung der Entfeuchtungsleistung:

$$\Delta x = x_1 - x_2 \quad 10 - 8,8 = 1,2 \text{ g}$$

$$\dot{m}_w = \Delta x \times \dot{m}_L \quad 1 \text{ kg/s} \times 0,0012 \text{ kg} = 0,0012 \text{ kg/s} = 4,32 \text{ kg/h}$$

### Zu überdenken:

Je tiefer nun die Kühlflächentemperatur, desto mehr Leistung hat das Kühlregister.

Und je tiefer die Kühlflächentemperatur umso mehr wird entfeuchtet.

Also umso weniger wird bei gleicher Kälteleistung spürbar gekühlt.

Wenn in Sommer bei hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit gekühlt wird, muß ein großer Teil der Leistung zum entfeuchten verwendet werden.

### Ermittlung der Latenten und Sensiblen Kühlleistung:

Die Latente Kühlleistung ist dabei ( $2257 \text{ kJ/kg} + 9^\circ\text{C} \times 4,19 \text{ kJ/kg} = 2294 \text{ kJ/kg}$ )  
 $0,0012 \text{ kg} \times 2294 \text{ kJ/kg} = 2,75 \text{ kJ/kg}$

Damit ist die sensible Kühlleistung  $12,5 \text{ kJ/kg} - 2,75 \text{ kJ/kg} = 9,75 \text{ kJ/kg}$

Dies können wir auch aus dem Diagramm ablesen.

Punkt 1  $54,7 \text{ kJ/kg}$

Senkrechte nach unten mit Temperatur Linie  $20^\circ\text{C}$  Schnittpunkt  $44,95 \text{ kJ/kg}$   
(sensible  $54,7 - 44,95 = 9,75 \text{ kJ/kg}$ )

Schräge Linie mit Temperatur Linie  $20^\circ\text{C}$  Schnittpunkt  $42,2 \text{ kJ/kg}$   
(latente  $44,95 - 42,2 \text{ kJ/kg} = 2,75 \text{ kJ/kg}$ )

# Kühlung ohne Entfeuchtung

Liegt die Luftausgangs-Zustand unter oder gleich den Taupunkt der Kühlfläche wird nicht entfeuchtet.

Die Zustandsänderung verläuft senkrecht nach unten.

Es steigt damit der Feuchtegehalt in der Luft.

Es entsteht nur eine sensible Kühlleistung.

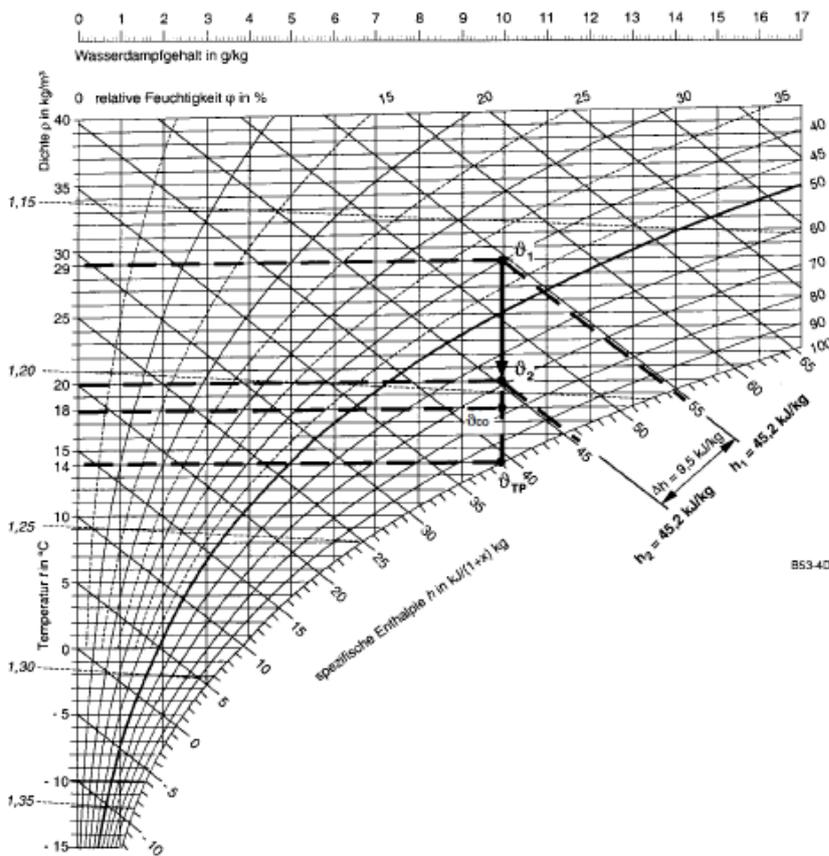
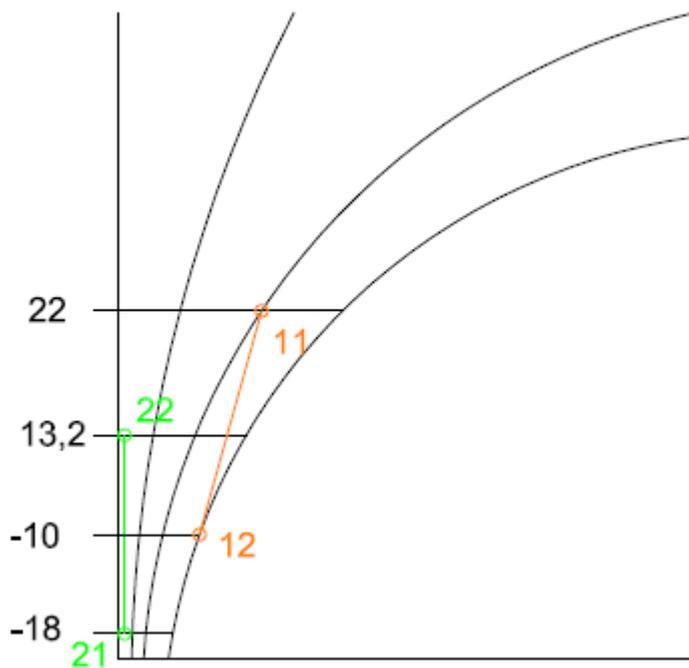


Fig. 3-4 Luftkühlung mit trockener Kühlfläche

# Wärmerückgewinnung



## Rückfeuchtezahl

Abluft

$$\psi_1 = \frac{x_{11} - x_{12}}{x_{11} - x_{21}}$$

Zuluft

$$\psi_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

Enthalpieänderungsgrad

$$\eta_H = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_{11} - h_{21}}$$

21 = Außenluft Eingang in Rekuperator  
22 = Außenluft Ausgang von Rekuperator

11 = Abluft Eingang in Rekuperator  
12 = Abluft Ausgang von Rekuperator

Durchschnittliche Wirkungsgrade der Wärmerückgewinnungen im Vergleich

1. Rekuperator (Kreuzstromwärmetauscher)	$\Phi$ 78 %	0,78
2. Kreislaufverbundsystem	$\Phi$ 55 %	0,55
3. Wärmerohr	$\Phi$ 76 %	0,76
4. Rotationswärmetauscher hygroskopisch	$\Phi$ 88 %	0,88
5. Rotationswärmetauscher nicht hygros.	$\Phi$ 85 %	0,85

## Zuluft

Erwärmungstemperatur der Zuluft

$$v_{22} = (\Phi_2 \times [v_{11} - v_{21}]) + v_{21} \quad (0,78 \times [22 - (-18)]) + (-18) = 13,2 \text{ °C}$$

Nötiger Wirkungsgrad für die Zuluft zum Erreichen einer Mindest- Zuluft Temperatur

$$\Phi_2 = \frac{v_{22} - v_{21}}{v_{11} - v_{21}} \quad \frac{10 - (-18)}{22 - (-18)} = 0,7$$

## Abluft

Fortlufttemperatur der Abluft

$$v_{12} = (-\Phi_1 \times [v_{11} - v_{21}]) + v_{11} \quad (-0,80 \times [22 - (-18)]) + 22 = -10 \text{ °C}$$

Nötiger Wirkungsgrad für die Zuluft zum Erreichen einer Mindest- Zuluft Temperatur

$$\Phi_1 = \frac{v_{11} - v_{12}}{v_{11} - v_{21}} \quad \frac{22 - (-10)}{22 - (-18)} = 0,8$$

Feuchteanfall in der Abluft

$$\dot{m}_w = \Delta x \times \dot{m}_L \quad \Delta x = x_1 - x_2$$