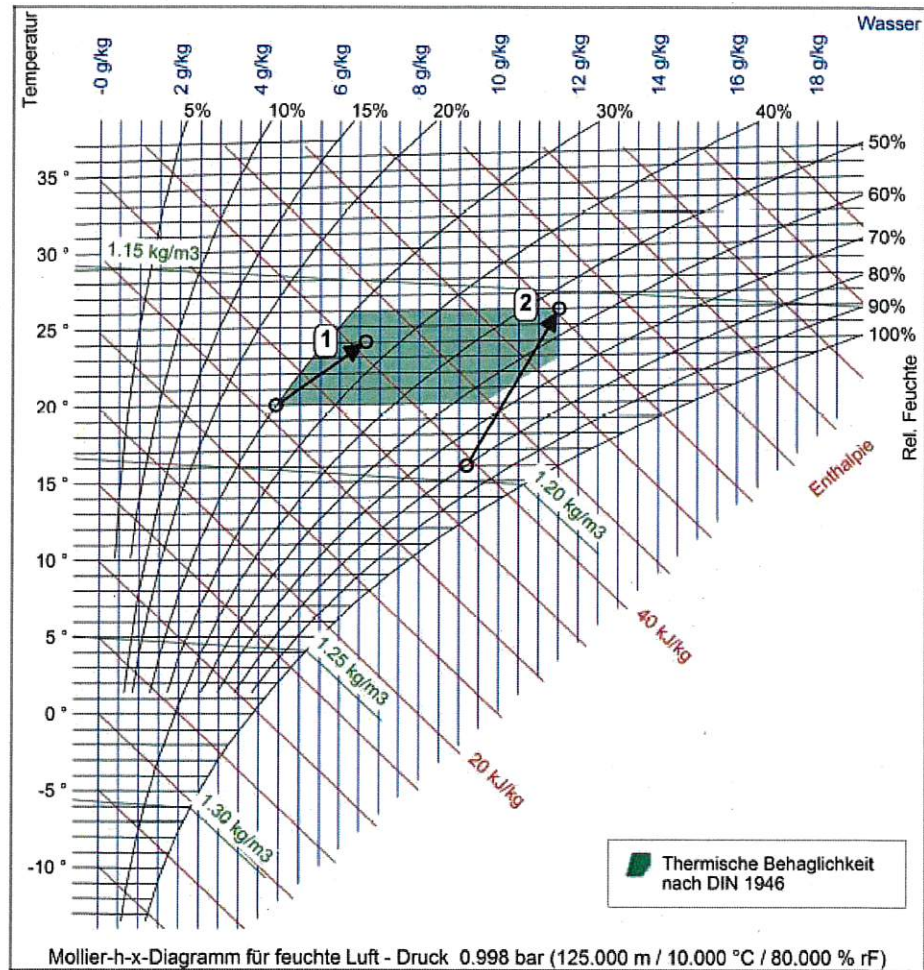


Das hx-Diagramm



Die Luft

Grundlagen

Die Luft umgibt die Erde in Form von einer ca. 200 km dicken Hülle und übt dabei einen veränderlichen Druck auf sie aus. Diesen Druck nennt man Luftdruck p_L , er kann z.B. an einem Barometer abgelesen werden.

Die Luft bewältigt viele Aufgaben. Sie versorgt uns mit Sauerstoff. So benötigen wir ca. 0.5 m^3 Luft pro Stunde zum atmen. Die Luft transportiert aber auch riesige Mengen an Wasser, das in Form von Regen und Schnee wieder zur Erde fällt.

Die Luft ist ein Gemisch aus Gasen, Verunreinigungen und Dämpfen. Trockene und reine Luft gibt es nur theoretisch, diese kommt in der freien Atmosphäre nicht vor.

Trockene reine Luft besteht aus:

Gas/Bezeichnung	Chem. Zeichen	Volumenprozent	Gewichtsprozent
Stickstoff	N ₂	78.060 %	75.490 %
Sauerstoff	O ₂	20.960 %	23.170 %
Argon	Ar	0.930 %	1.290 %
Kohlendioxid	CO ₂	0.030 %	0.040 %
Wasserstoff	H ₂	0.010 %	0.001 %
Neon	Ne	0.002 %	0.001 %
Helium	He	0.008 %	0.008 %
Krypton	Kr	0.008 %	0.008 %
Xenon	Xe	0.008 %	0.008 %

Feuchte Luft ist immer eine Mischung aus trockener Luft und Wasserdampf. Der Wasserdampfanteil ist für Lüftungs- und Klimaanlage von enormer Bedeutung (Behaglichkeit). Der Wasserdampfgehalt ist nie konstant und er kann grossen Schwankungen unterworfen sein.

Der Aufbau des hx-Diagrammes

Als Bezugsgrösse im hx-Diagramm dient immer ein Kilogramm trockene Luft und nicht etwa ein Kilogramm Gemisch aus Luft und Wasserdampf!

Der Druck p_L [mbar, hPa]

In jedem Hx-Diagramm müssen der mittlere Barometerstand (der sogenannte Bezugsluftdruck) sowie die Höhe über Meer angegeben sein.

Ein hx-Diagramm hat also immer nur für einen bestimmten Luftdruck Gültigkeit. Für andere Höhen müssen die Diagramme korrigiert resp. die Werte entsprechend umgerechnet werden.

Der Luftdruck wird mit dem Barometer gemessen.

Die Temperatur T, ϑ [°C, K]

Die Temperatur kennzeichnet den Wärmezustand der Luft. Die Linien konstanter Temperatur verlaufen von links leicht steigend nach rechts. Die Temperaturskala befindet sich links vom hx-Diagramm auf der Ordinate (y-Achse). Diese Achse entspricht gleichzeitig $x = 0$ g/kg (absolute Feuchtigkeit).

Die Temperatur wird mit einem Thermometer gemessen.

Die absolute Feuchtigkeit x [g/kg]

Sie gibt an wie viel Wasserdampf pro 1 kg trockener Luft vorhanden ist. Die Linien konstanter absoluter Feuchtigkeit verlaufen vertikal und sind parallel zueinander. Die Skala für die absolute Feuchtigkeit befindet sich auf der Abzisse (x-Achse) unterhalb des Diagrammes.

Die absolute Feuchtigkeit kann mit speziellen Messgeräten ermittelt werden.

Die relative Feuchtigkeit ϕ [% r.F.]

Diese Grösse hat grossen Einfluss auf die Behaglichkeit der Menschen. Mit ihr bezeichnet man das Verhältnis der in der Luft vorhandenen Wasserdampfmenge zur grösstmöglichen Wasserdampfmenge bei gesättigter Luft. Dieser Wert ist stark temperaturabhängig. Alle Punkte der gleichen relativen Feuchtigkeit miteinander verbunden ergeben die Linien konstanter relativer Feuchtigkeit und geben dem hx-Diagramm das typische Aussehen. Die Skala befindet sich oben oder rechts, jeweils am Ende der Linien.

Die relative Feuchtigkeit kann mittels Hygrometer gemessen werden.

$$r.F. = \frac{\text{Vorhandene _ Dampfmenge}}{\text{Dampfmenge _ gesättigte _ Luft}} \times 100$$

$$r.F. = \frac{p_D}{p_s} \times 100$$

p_D = Wasserdampf-Teildruck

p_s = Wasserdampf-Sättigungsdruck

Die Sättigungslinie

Werden alle Punkte mit relativer Feuchtigkeit = 100 % miteinander verbunden, erhalten wir die Sättigungslinie. Die Sättigungslinie teilt das hx-Diagramm in ein überhitztes Gebiet und in ein Nebelgebiet. Das überhitzte Gebiet stellt unseren normalen Arbeitsbereich dar, das Nebelgebiet befindet sich unterhalb der Sättigungslinie.

Überhitztes Gebiet = ungesättigter Dampf = Heissdampf

Nebel-Gebiet = übersättigter Dampf = Nassdampf

Die Enthalpie h [KJ/kg]

Die Enthalpie wird auch Wärmeinhalt genannt. Sie gibt die bei einer bestimmten Temperatur und Feuchtigkeit in der Luft enthaltene Wärmemenge an. Der Linienvverlauf ist von oben links schräg nach unten rechts. Die Werte können unterhalb der Linien konstanter Enthalpie abgelesen werden.

Der Wärmeinhalt h und die Temperatur T sind links auf der Linie konstanter absoluter Feuchtigkeit = 0 g/kg identisch, weil die spezifische Wärmekapazität mit 1.006 KJ/kg, K gerundet ca. 1 ergibt.

Die Enthalpie steigt an, wenn sich die Temperatur oder die Feuchtigkeit erhöht.

Die Dichte ρ [kg/m³]

Die Dichte ist der Quotient aus der Luftmasse m [kg] und dem Luftvolumen V [m³] bei einer bestimmten Temperatur und Druck. Die Linien verlaufen von links leicht geneigt nach rechts. Das heisst mit zunehmender Feuchtigkeit wird die Luft immer leichter.

Die Dichte kann im hx-Diagramm an den gestrichelten Linien abgelesen werden.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Die Enthalpie der feuchten Luft – Herleitung

Wie oben schon erwähnt beschreibt die Enthalpie den Energieinhalt der Luft. In den von uns verwendeten hx-Diagrammen befindet sich $h = 0$ KJ/kg beim Schnittpunkt $\vartheta = 0$ °C und $x = 0$ g/kg. Erhöhen wir die Temperatur (vertikal nach oben) oder die absolute Feuchtigkeit (horizontal nach rechts) nimmt auch die Enthalpie zu.

Wenn wir den Luftzustand von beispielsweise 3 °C und 40 % r.F. mit dem oben erwähnten Punkt $h = 0$ KJ/kg vergleichen stellen wir fest, dass sich einerseits die Luft erwärmt hat und dass auch die Feuchtigkeit zugenommen hat.

Es wurde also Energie aufgewendet um die Luft von 0 °C auf 3 °C zu erwärmen.

Da Wasser bei 3 °C normalerweise flüssig und nicht dampfförmig ist, musste einerseits Energie aufgewendet werden, um aus Wasser Dampf herzustellen. Zusätzliche Energie wurde benötigt um den Wasserdampf von 0 °C auf 3 °C zu erwärmen.

Die Enthalpie setzt sich also aus drei verschiedenen Teilen zusammen:

Enthalpie bezogen auf 0 °C:

h_{TOT}	Enthalpie total in KJ/kg	$h_{TOT} = h_{LUFT} + h_{DAMPF} + h_r$
h_{LUFT}	Enthalpie trockener Luft in KJ/kg	
h_{DAMPF}	Enthalpie Wasserdampf in KJ/kg	
h_r	Verdampfungswärme Wasserd. bei 0°C in KJ/kg	

Die einzelnen Komponenten können noch weiter zerlegt werden:

Erwärmung der trockenen Luft von 0 °C auf ϑ ($c_p=1.006$ KJ/kg,K):

h_{LUFT}	Enthalpie trockener Luft in KJ/kg	$h_{LUFT} = c_p \cdot \vartheta$
c_p	spez. Wärmekapazität der Luft in KJ/kg,K	
ϑ	Temperatur der Luft in °C	

Erwärmung des Wasserdampfes von 0 °C auf ϑ ($c_p=1.86 \text{ kJ/kg,K}$):

h_{DAMP}	Enthalpie Wasserdampf in kJ/kg	$h_{\text{DAMPF}} = c_p \cdot \vartheta \cdot x$
c_p	spez. Wärmekapazität Wasserdampf in kJ/kg,K	
ϑ	Temperatur des Wasserdampfes in °C	
x	absolute Feuchtigkeit in kg/kg	

Wasser verdampfen bei 0°C ($r_D=2500 \text{ kJ/kg}$):

h_r	Verdampfungswärme Wasserd. bei 0°C in kJ/kg	$h_r = x \cdot r_D$
x	absolute Feuchtigkeit in kg/kg	
r_D	Verdampfungswärme bei 0°C in kJ/kg	

Übungen

Bestimmen Sie rechnerisch die Enthalpie von folgenden Luftzuständen:

Luftzustand 1 $\vartheta = 28 \text{ °C}$ und $x = 8 \text{ g/kg}$

Luftzustand 2 $\vartheta = -3 \text{ °C}$ und $x = 2 \text{ g/kg}$

Luftzustand 1 $\vartheta = 30 \text{ °C}$ und $x = 0 \text{ g/kg}$

Kontrollieren Sie die Resultate in einem hx-Diagramm.

Übungen

Der Wasserdampfteildruck p_D [mbar, kPa]

Mit diesem Druck wird der bei einem Gasgemisch der vom Wasserdampf beanspruchte Teildruck spezifiziert (Gesetz von Dalton).

Je nach Diagrammkonstruktion befindet sich die Skala oben oder unten, ausserhalb des Diagramms.

Beispiel 1

Gegeben: Raumlufzustand $\vartheta = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi = 60\text{ }\%$
 Gesucht: Wasserdampfdruck $p_D = \underline{\hspace{2cm}}$

Der Wasserdampf-sättigungsdruck p_s [mbar, kPa]

Mit diesem Druck wird der vom Wasserdampf beanspruchte Teildruck bei gesättigter Luft ($j = 100\%$) angegeben.

Abgelesen wird er aus der gleichen Skala wie der Teildruck.

Beispiel 2

Gegeben: Raumlufzustand $\vartheta = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi = 70\text{ }\%$

Gesucht: Wasserdampf-sättigungsdruck $p_s = \underline{\hspace{2cm}}$

Die Taupunkttemperatur ϑ_{TP} [°C]

Bei dieser Temperatur ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt und kann kein zusätzliches Wasser aufnehmen.

Ausgangspunkt ist immer ein Luftzustand irgendwo im h_x -Diagramm. Die Taupunkttemperatur kann ermittelt werden indem man von diesem Luftzustand der x -Linie vertikal nach unten bis zur Sättigungslinie folgt und dann links auf der Temperaturskala die ϑ_{TP} abliest.

Beispiel 3

Gegeben: Raumlufzustand $\vartheta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi = 35\text{ \%}$
 Gesucht: Taupunkttemperatur $\vartheta_{\text{TP}} =$

Die Feuchtkugeltemperatur ϑ_{FK} [°C]

Die Feuchtkugeltemperatur wird auch Kühlgrenze genannt, weil sich die Luft nach Erreichen dieser Temperatur nicht mehr weiter (adiabatisch) abkühlen kann.

Um die Feuchtkugeltemperatur zu konstruieren, folgt man vom Ausgangspunkt im Diagramm entlang der Enthalpielinie zur Sättigungslinie und liest schliesslich links auf der Temperaturskala die ϑ_{FK} ab.

Beispiel 4

Gegeben:	Raumluftzustand	$\vartheta = 6\text{ °C}$
		$\varphi = 70\text{ %}$
Gesucht:	Feuchtkugeltemperatur	$\vartheta_{FK} = \underline{\hspace{2cm}}$

Die Lösungen sind auf dem hx-Diagramm auf Seite 7 zu konstruieren.

Wie wird das hx-Diagramm angewendet?

a) Das Mischen zweier Luftmengen

Beim Mischen von zwei Luftmengen m_1 und m_2 mit verschiedenen Zuständen ergibt sich ein Mischpunkt mit einem neuen, dritten Zustand.

Diesen Vorgang treffen wir vor allem dort an, wo Umluft mit Aussenluft vermischt wird oder bei speziellen Auslass-Systemen wo sich die aufbereitete Primärluft direkt im Raum mit Sekundärluft (Raumlufte) mischt.

Der Mischpunkt kann einerseits rechnerisch oder graphisch im hx-Diagramm ermittelt werden. Mit der unten beschriebenen Einschränkung können grundsätzlich beide Varianten verwendet werden.

Der Mischpunkt (rechnerische Lösung)

Die rechnerische Methode kann nur verwendet werden, wenn sich der Mischpunkt im überhitzten Gebiet befindet oder die Luft unmittelbar auf die Mischung erwärmt wird.

Ein Luftzustand definiert sich immer über eine Temperatur und eine Feuchtigkeit. Es sind daher zwei Formeln nötig, um den Mischpunkt genau bestimmen zu können.

Mischtemperatur

ϑ_m	Mischtemperatur in °C	$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 \times m_1 + \vartheta_2 \times m_2}{m_1 + m_2}$
ϑ_1	Temperatur Luftzustand 1 in °C	
m_1	Massenstrom Luftzustand 1 in kg/h	
ϑ_2	Temperatur Luftzustand 2 in °C	
m_2	Massenstrom Luftzustand 2 in kg/h	

Mischfeuchtigkeit (absolute)

x_m	Absolute Mischfeuchtigkeit in g/kg	$x_m = \frac{x_1 \times m_1 + x_2 \times m_2}{m_1 + m_2}$
x_1	Absolute Feuchtigkeit Luftzustand 1 in g/kg	
m_1	Massenstrom Luftzustand 1 in kg/h	
x_2	Absolute Feuchtigkeit Luftzustand 2 in g/kg	
m_2	Massenstrom Luftzustand 2 in kg/h	

Der Mischpunkt (graphische Lösung)

Die graphische Lösung kann auch verwendet werden, wenn sich der Mischpunkt im Nebelgebiet befindet.

l	Distanz aus hx zwischen Zustand 1 und 2 in mm	$l_2 = \frac{\dot{m}_1 \times l}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad \text{oder} \quad l_1 = \frac{\dot{m}_2 \times l}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$
l_1	Strecke vom Zustand 1 zum Mischpunkt in mm	
l_2	Strecke vom Zustand 2 zum Mischpunkt in mm	
$\dot{m}_1$	Massenstrom Luftzustand 1 in kg/h	
$\dot{m}_2$	Massenstrom Luftzustand 2 in kg/h	

Übungen

Gegeben: Aussenluft -10 °C, 1.5 g/kg, 2'200 m³/h
Umluft +20 °C, 6.2 g/kg, 4'800 m³/h

Gesucht: Bestimmen Sie den Mischpunkt (ϑ und x) graphisch und rechnerisch. Verwenden Sie dazu das hx-Diagramm auf Seite 10.

Beispiel 6 (Nebelgebiet)

Gegeben: Aussenluft -12 °C, 1.3 g/kg, 6'600 m³/h
Umluft +20 °C, 10.9 g/kg, 4'900 m³/h

Gesucht: Bestimmen Sie den Mischpunkt (ϑ und x) graphisch. Verwenden Sie dazu das hx-Diagramm auf Seite 11.

Zusatzaufgabe

Gegeben: Primärluft (Zuluft) +8 °C, 30 % r.F., 1'200 m³/h
Sekundärluft (Raumluft) +26 °C, 50 % r.F., 3'800 m³/h

Gesucht: Bestimmen Sie den Mischpunkt (ϑ und x) rechnerisch. Welche Kühlleistung kann mit der Mischluft im Raum erreicht werden, wenn der Sollwert für die Raumlufttemperatur bei 24 °C liegt?

Die Lufterwärmung

Die Lufterwärmung ist die einfachste Art einer Zustandsänderung im hx-Diagramm. Der Luft wird weder Wasser zugeführt noch entzogen. Der Erwärmungsvorgang verläuft aus diesem Grund immer entlang einer Linie konstanter absoluter Feuchtigkeit senkrecht nach oben.

Die relative Luftfeuchtigkeit wird mit zunehmender Erwärmung geringer.

Die dazugehörigen Formeln lauten:

Die Lufterhitzerleistung ($c_{pL}=1.006 \text{ kJ/kg, K}$)

Q_{LE}	Lufterhitzerleistung in kW	$Q_{LE} = \frac{\dot{V} \times \rho \times c_{pL} \times \Delta\vartheta_L}{3600}$
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom in m^3/h	
ρ	Dichte der Luft in kg/m^3	
c_{pL}	Spezifische Wärmekapazität von Luft in $\text{kJ}/\text{kg, K}$	
$\Delta\vartheta_L$	Temperaturdifferenz Luft Eintritt/Luft Austritt in K	

Der Massenstrom wasserseitig ($c_W=4.187 \text{ kJ/kg, K}$)

$\dot{m}_W$	Massenstrom Warmwasser in kg/h	$\dot{m}_W = \frac{Q_{LE} \times 3600}{c_W \times \Delta\vartheta_W}$
Q_{LE}	Lufterhitzerleistung in kW	
c_W	Spezifische Wärmekapazität von Wasser in $\text{kJ}/\text{kg, K}$	
$\Delta\vartheta_W$	Temperaturdifferenz Wassereintritt/Wasseraustritt in K	

Übungen

Gegeben:	Aussenluftzustand	-12 °C, 1.3 g/kg, 8'200 m^3/h
	Zulufttemperatur	+32 °C
	Wassertemperaturen	Vorlauf 50 °C, Rücklauf 30 °C
Gesucht:	Enthalpie vom Lufterintrittszustand	$h_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
	Enthalpie vom Luftaustrittszustand	$h_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
	Absolute Feuchtigkeit vom Luftaustritt	$x_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
	Enthalpiedifferenz	$\Delta h = \underline{\hspace{2cm}}$
	Lufterhitzerleistung	$Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom wasserseitig	$\dot{m}_W = \underline{\hspace{2cm}}$

Lösung:

Gegeben:	Aussenluft	-12 °C, 1.0 g/kg, 7'600 m ³ /h
	Umluft	+22 °C, 7.5 g/kg, 2'900 m ³ /h
	Zulufttemperatur	+36 °C
Gesucht:	Mischtemperatur	$\vartheta_m = \underline{\hspace{2cm}}$
	Lufterhitzerleistung	$Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$
Lösung:		

Luftkühlung (trocken)

Die trockene Luftkühlung kann am einfachsten als umgekehrter Vorgang der Lufterwärmung beschrieben werden.

Die Luft kommt in einem Wärmetauscher mit einer kühleren Oberfläche in Berührung und die Oberflächentemperatur des Kühlers liegt über der Taupunkttemperatur der zu behandelnden Luft. Es findet keine Wasserausscheidung statt. Der absolute Feuchtigkeitsgehalt der Luft bleibt unverändert.

Die Zustandsänderung verläuft also entlang der Linien absoluter Feuchtigkeit senkrecht nach unten.

Die Luft kühlt sich nie ganz auf die Oberflächentemperatur des Kühlers ab, da nur ein Teil der Luft auch direkt mit dem Kühler in Berührung kommt (Bypass-Faktor). Nach dem Kühler findet sich eine Mischung aus gekühlter Luft, die entlang der Lamellen geströmt ist und aus ungekühlter Luft, die den Kühler praktisch ohne Berührung der kalten Oberfläche passiert hat.

Die Luftaustrittstemperatur aus dem Kühler liegt daher immer zwischen 2 bis 5 K über der Oberflächentemperatur. Diese Temperaturdifferenz nennt man Kühlannäherung.

Die Oberflächentemperatur von einem Kühler ist abhängig von der Bauart und kann vereinfacht mit folgender Formel berechnet werden:

Die Oberflächentemperatur von einem Kaltwasser-Wärmetauscher

ϑ_O	Oberflächentemperatur in °C	$\vartheta_O = \frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2} + 1$
ϑ_{VL}	Vorlauftemperatur Kaltwasser in °C	
ϑ_{RL}	Rücklauftemperatur Kaltwasser in °C	

Die Oberflächentemperatur von einem Direktverdampfer-Wärmetauscher entspricht vereinfacht der Verdampfungstemperatur des Kältemittels.

Die Luftkühlerleistung

Q_{LK}	Luftkühlerleistung in kW	$Q_{LK} = \frac{V \times \rho \times \Delta h}{3600}$
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom in m ³ /h	
ρ	Dichte der Luft in kg/m ³	
Δh	Enthalpiedifferenz Lufteintritt/Luftaustritt in KJ/Kg	

Der Massenstrom wasserseitig ($c_w=4.187$ KJ/kg, K)

$\dot{m}_w$	Massenstrom Kaltwasser in kg/h	$\dot{m}_w = \frac{Q_{LK} \times 3600}{c_w \times \Delta \vartheta_w}$
Q_{LK}	Luftkühlerleistung in kW	
c_w	Spezifische Wärmekapazität Wasser in KJ/kg, K	
$\Delta \vartheta_w$	Temperaturdifferenz Wassereintritt/Wasseraustritt in K	

Übungen

Gegeben:	Aussenluftzustand	+32 °C, 30 % r.F., 6'300 m ³ /h
	Zulufttemperatur	+18 °C
	Wassertemperaturen	Vorlauf 12 °C, Rücklauf 16 °C
Gesucht:	Oberflächentemperatur	$\vartheta_o = \underline{\hspace{2cm}}$
	Enthalpiedifferenz	$\Delta h = \underline{\hspace{2cm}}$
	Luftkühlerleistung	$Q_{LK} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Relative Feuchtigkeit vom Luftaustritt	$\varphi_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom wasserseitig	$\dot{m}_w = \underline{\hspace{2cm}}$

Luftkühlung (mit Wasserausscheidung)

Die Luft kommt auch hier mit einer kühleren Oberfläche in Berührung wobei die Oberflächentemperatur des Kühlers nun unterhalb der Taupunkttemperatur der zu behandelnden Luft liegt.

Ein Teil des Wasserdampfes in der behandelten Luft kondensiert an der Kühloberfläche und dadurch findet eine Wasserausscheidung statt. Daher verläuft dieser Vorgang im hx-Diagramm nicht senkrecht nach unten sondern leicht gebogen nach links. Die absolute Feuchtigkeit nimmt ab.

Die Luft kühlt sich nie ganz auf die Oberflächentemperatur des Kühlers ab, da nur ein Teil der Luft auch direkt mit dem Kühler in Berührung kommt (Bypass-Faktor). Nach dem Kühler findet sich eine Mischung aus gekühlter und entfeuchteter Luft, aus nur gekühlter Luft und aus ungekühlter Luft.

Die Luftaustrittstemperatur aus dem Kühler liegt daher immer zwischen 2 bis 5 K über der Oberflächentemperatur. Diese Temperaturdifferenz nennt man Kühlannäherung.

Die Oberflächentemperatur von einem Kühler ist abhängig von der Bauart und kann vereinfacht mit folgender Formel berechnet werden:

Die Oberflächentemperatur von einem Kaltwasser-Wärmetauscher

ϑ_O	Oberflächentemperatur in °C	$\vartheta_O = \frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2} + 1$
ϑ_{VL}	Vorlauftemperatur Kaltwasser in °C	
ϑ_{RL}	Rücklauftemperatur Kaltwasser in °C	

Die Oberflächentemperatur von einem Direktverdampfer-Wärmetauscher entspricht vereinfacht der Verdampfungstemperatur des Kältemittels.

Die Luftkühlerleistung

Q_{LK}	Luftkühlerleistung in kW	$Q_{LK} = \frac{\dot{V} \times \rho \times \Delta h}{3600}$
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom in m³/h	
ρ	Dichte der Luft in kg/m³	
Δh	Enthalpiedifferenz Lufteintritt/Luftaustritt in KJ/Kg	

Der Massenstrom wasserseitig ($c_w=4.187$ KJ/kg, K)

$\dot{m}_W$	Massenstrom Kaltwasser in kg/h	$\dot{m}_W = \frac{Q_{LK} \times 3600}{c_w \times \Delta \vartheta_W}$
Q_{LK}	Luftkühlerleistung in kW	
c_w	Spezifische Wärmekapazität Wasser in KJ/kg, K	
$\Delta \vartheta_W$	Temperaturdifferenz Wassereintritt/Wasseraustritt in K	

Beispiel 10

Gegeben: Aussenluftzustand +32 °C, 30 % r.F., 6'300 m³/h

	Zulufttemperatur	+18 °C
	Wassertemperaturen	Vorlauf 6 °C, Rücklauf 12 °C
Gesucht:	Oberflächentemperatur	$\vartheta_o =$ _____
	Enthalpiedifferenz	$\Delta h =$ _____
	Luftkühlerleistung	$Q_{LK} =$ _____
	Relative Feuchtigkeit vom Luftaustritt	$\varphi_2 =$ _____
	Massenstrom wasserseitig	$m_w =$ _____

Luftbefeuchtung (Zerstäuber und Verdunster)

Aus dem Kapitel „Luftbefeuchtung“ ist ersichtlich, dass es verschiedene Möglichkeiten zur Luftbefeuchtung gibt. In diesem Unterkapitel werden die Befeuchter behandelt, die zur Familie der Zerstäuber oder Verdunster gehören und nach dem Prinzip der adiabatischen Luftbefeuchtung funktionieren.

Die Luft kühlt sich dabei unter gleichzeitiger Wasseraufnahme ab. Dieser Vorgang wird adiabatisch genannt, weil er ohne äussere Wärmezufuhr oder Wärmeabgabe erfolgt. Die zur Verdunstung des Wassers erforderliche Wärme (Verdunstungswärme) wird direkt aus der umliegenden Luft bezogen. Aus diesem Grund kühlt sich die Luft bei der adiabatischen Luftbefeuchtung ab. Der gesamte Wärmeinhalt der Luft h_{TOT} bleibt dabei konstant. Der Anteil h_{LUFT} nimmt allerdings ab, der Anteil h_{DAMPF} und h_r nimmt zu. Beachten Sie dazu die Herleitung der Enthalpie auf Seite 5. Berechnen Sie die Enthalpie für folgende Luftzustände: 30°C und 4 g/kg, 20°C und 8 g/kg. Vergleichen Sie die Zusammensetzung von $h_{TOT} = h_{LUFT} + h_{DAMPF} + h_r$.

Beim Befeuchten nimmt die absolute Feuchtigkeit zu.

Bei Zerstäubern und Verdunstern spricht man vom Befeuchtungswirkungsgrad. Er bildet das Verhältnis von der erreichten absoluten Feuchtedifferenz zur maximal möglichen absoluten Feuchtedifferenz. Die grösstmöglichen Befeuchtungswirkungsgrade liegen zwischen 80 bis 95 %. Sie sind von der Konstruktion der Befeuchter abhängig und müssen den Herstellerunterlagen entnommen werden.

Der Befeuchtungswirkungsgrad

η_{BEF}	Befeuchtungswirkungsgrad (dimensionslos)	$\eta_{BEF} = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$
x_1	Eintrittszustand Befeuchter (absolut) in g/kg	
x_2	Austrittszustand Befeuchter (absolut) in g/kg	
x_3	Zustand bei der Sättigungslinie in g/kg	

Die Befeuchtungsleistung (Massenstrom Wasserdampf)

$\dot{m}_D$	Massenstrom Wasserdampf in kg/h	$\dot{m}_D = \frac{\dot{V} \times \rho \times \Delta x}{1000}$
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom in m³/h	
ρ	Dichte der Luft in kg/m³	
Δx	Absolute Feuchtedifferenz in g/kg	

Übungen

Das Befeuchtungswasser kann theoretisch vorgewärmt oder vorgekühlt werden. Daraus ergibt sich ein Verlauf im hx-Diagramm, der nicht mehr unter konstanter Enthalpie h stattfindet (siehe Beispiel 12).

Die Erwärmung (Bakterienbildung) und Kühlung (zusätzlicher Energieaufwand) des Befeuchterwassers kommt nur in Spezialfällen zur Anwendung.

Beispiel 11

Gegeben:	Eintrittszustand Befeuchter	+27 °C, 30 % r.F., 4'750 m ³ /h
	Austrittszustand Befeuchter	80 % r.F.
Gesucht:	Befeuchtungswirkungsgrad	$\eta_{\text{BEF}} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Austrittstemperatur Befeuchter	$\vartheta_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom Befeuchtungswasser	$\dot{m}_D = \underline{\hspace{2cm}}$

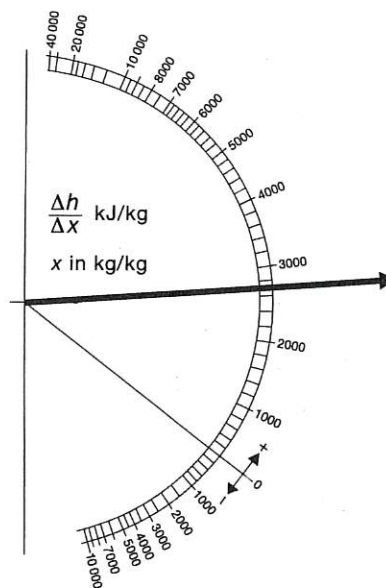
Gegeben:	Eintrittszustand Befeuchter	+20 °C, 50 % r.F.
	Wassereintrittstemperaturen Befeuchter	
	a)	21 °C
	b)	17 °C
	c)	13.5 °C
	d)	11 °C
	e)	6 °C
Gesucht:	Befeuchtungsverlauf	

Luftbefeuchtung mit Dampf

Bei den Dampfbefeuchtern wird dem Luftstrom Wasserdampf (Sattdampf) beigemischt. Bei der Befeuchtung mit Dampf ändert sich neben der absoluten Feuchtigkeit auch die Enthalpie h (Wärmeinhalt) der Luft. Das liegt daran, dass der Dampf ausserhalb der Lüftungsanlage hergestellt wird und die Verdampfungswärme schon dort zugeführt wurde (meist elektrisch).

Die genaue Richtung der Zustandsänderung im h - x -Diagramm ist vom Wärmeinhalt des Dampfes abhängig. Dieser Wärmeinhalt kann anhand der Dampftemperatur mit Hilfe einer Dampftabelle ermittelt werden. Auf der nächsten Seite ist eine Dampftabelle abgebildet. Der Wärmeinhalt von Dampf mit einer Temperatur von 100 °C beträgt z.B. $h'' = 2'676 \text{ kJ/kg}$.

Sobald der Wärmeinhalt des Dampfes ermittelt wurde kann anhand des Randmassstabes die Richtung der Zustandsänderung konstruiert werden:



Die Befeuchtungsleistung (Massenstrom Wasserdampf)

$\dot{m}_D$	Massenstrom Wasserdampf in kg/h	$\dot{m}_D = \frac{\dot{V} \times \rho \times \Delta x}{1000}$
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom in m³/h	
ρ	Dichte der Luft in kg/m³	
Δx	Absolute Feuchtedifferenz in g/kg	

Dampftabelle für Wasserdampf

Temperatur	Druck	Spezifisches Volumen		Enthalpie		
t	p	v'	v''	h'	h''	r
°C	bar	dm³/kg	m³/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
0.01	0.01	1.0002	205.99	0	2501	2501
10	0.01	1.0003	106.32	42	2519	2477
20	0.02	1.0018	57.779	84	2537	2453
30	0.04	1.0044	32.996	126	2555	2430
40	0.07	1.0079	19.528	168	2573	2406
50	0.12	1.0122	12.037	209	2591	2382
60	0.2	1.0171	7.674	251	2609	2358
70	0.31	1.0228	5.0446	293	2626	2333
80	0.47	1.029	3.4088	335	2643	2308
90	0.7	1.0359	2.3617	377	2660	2283
100	1.01	1.0434	1.6736	419	2676	2257
120	1.98	1.0603	0.8922	504	2706	2202
130	2.7	1.0697	0.6687	546	2720	2174
140	3.61	1.0797	0.5099	589	2734	2145
150	4.76	1.0904	0.3929	632	2746	2114
160	6.18	1.1019	0.3071	676	2758	2082
170	7.91	1.1142	0.2428	719	2769	2049
180	10.02	1.1273	0.194	763	2778	2015
190	12.54	1.1414	0.1565	808	2786	1978
200	15.54	1.1564	0.1273	852	2793	1940
210	19.06	1.1726	0.1044	898	2798	1900
220	23.18	1.19	0.0862	944	2801	1858
230	27.95	1.2088	0.0716	990	2803	1813
240	33.45	1.2292	0.0597	1037	2803	1766
250	39.74	1.2515	0.0501	1085	2801	1715

Übungen

Gegeben: Eintrittszustand Befeuchter +22 °C, 30 % r.F., 5'250 m³/h
 Austrittszustand Befeuchter 50 % r.F.
 Dampftemperatur 100 °C

Gesucht: absolute Feuchtedifferenz $\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
 Austrittstemperatur Befeuchter $\vartheta_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
 Massenstrom Wasserdampf $m_D = \underline{\hspace{2cm}}$

Gegeben: Eintrittszustand Befeuchter 1.4 g/kg
 Austrittszustand Befeuchter +25 °C, 8.4 g/kg
 Zustandsänderung Δh 19.5 kJ/kg

Gesucht: absolute Feuchtedifferenz $\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
 Eintrittstemperatur Befeuchter $\vartheta_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
 Wärmehalt des Wasserdampfes $h'' = \underline{\hspace{2cm}}$

Luftentfeuchtung

Beim Entfeuchten der Luft (Lufttrocknung) wird der Wasserdampfgehalt x in der Luft verringert. Dabei können verschiedene Methoden unterschieden werden:

Entfeuchtung durch Kühlung

Diese Art der Entfeuchtung wurde unter dem Punkt „Luftkühlung mit Entfeuchtung“ schon behandelt. Oft wird die Luft nach der Entfeuchtung wieder aufgeheizt. Für die Lufterwärmung ist es sinnvoll, die Abwärme des Kälteprozesses (Kälteerzeugung) zu verwenden.

Siehe Beispiel Nr. 15

Entfeuchtung durch Mischung

Das Mischen von zwei Luftmengen mit unterschiedlichen Zuständen führt ebenfalls zu einer Entfeuchtung. Diese Methode wird sehr oft in Hallenbädern angewendet. Dazu wird kalte und trockene Aussenluft mit der feuchten Abluft gemischt.

Siehe Beispiel Nr. 16

Entfeuchtung durch Adsorption

Bei dieser Methode wird die Luft an einem wasserfreundlichen, hygroskopischen Stoff (Kieselgel, Silikagel) vorbeigeführt.

Der Wasserdampf haftet an der grossen Oberfläche (1 g Kiesel $\sim 300\text{--}500\text{ m}^2$), kondensiert und setzt dadurch Verdampfungswärme frei. Die Lufttemperatur erhöht sich bei diesem Vorgang.

Im hx-Diagramm verläuft dieser Entfeuchtungsvorgang unter konstanter Enthalpie h nach oben.

Das Kieselgel muss nach seiner Sättigung mit Wasserdampf regeneriert werden. Das geschieht mittels heisser Luft mit einer Temperatur von $150\text{ }^\circ\text{C}$ bis $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Siehe Beispiel Nr. 17

Übungen

Gegeben:	Aussenluftzustand	$+32\text{ }^\circ\text{C}$, 30 % r.F., $6'300\text{ m}^3/\text{h}$
	Austrittszustand Kühler	80 % r.F.
	Wassertemperaturen	Vorlauf $6\text{ }^\circ\text{C}$, Rücklauf $12\text{ }^\circ\text{C}$
Gesucht:	Oberflächentemperatur	$\vartheta_o = \underline{\hspace{2cm}}$
	Enthalpiedifferenz	$\Delta h = \underline{\hspace{2cm}}$
	Luftkühlerleistung	$Q_{LK} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Entfeuchtungsleistung	$\dot{m}_w = \underline{\hspace{2cm}}$

Beispiel 16

Gegeben:	Aussenluft	$-5\text{ }^\circ\text{C}$, 85 % r.F., $4'300\text{ m}^3/\text{h}$
	Umluft	$+24\text{ }^\circ\text{C}$, 55 % r.F., $2'800\text{ m}^3/\text{h}$
Gesucht:	Mischtemperatur	$\vartheta_M = \underline{\hspace{2cm}}$
	absolute Feuchtedifferenz Entfeuchtung	$\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
	Entfeuchtungsleistung	$\dot{m}_w = \underline{\hspace{2cm}}$

Gegeben: Eintritt Entfeuchter 4 °C, 80 % r.F.
 Austritt Entfeuchter 10 °C, 25 % r.F.
 Volumenstrom Eintritt 3'350 m³/h

Gesucht: absolute Feuchtedifferenz Entfeuchtung $\Delta x =$ _____
 Entfeuchtungsleistung $m_w =$ _____

Zusatzaufgaben einzelne Vorgänge im hx-Diagramm

- Gegeben: Raumlufzustand $\vartheta = 18\text{ °C}$
 $\varphi = 20\%$
- Gesucht: Wasserdampfteildruck $p_D = \underline{\hspace{2cm}}$
Wasserdampfsättigungsdruck $p_S = \underline{\hspace{2cm}}$
Taupunkttemperatur $\vartheta_{TP} = \underline{\hspace{2cm}}$
Feuchtkugeltemperatur $\vartheta_{FK} = \underline{\hspace{2cm}}$
- G
egeben: Aussenluft $+30\text{ °C}$, 40 % r.F., 1'700 m³/h
Umluft $+20\text{ °C}$, 35 % r.F., 6'890 m³/h
- Gesucht: Bestimmen Sie den Mischpunkt (ϑ und x) graphisch und rechnerisch.
- Gegeben: Massenstrom wasserseitig 4'215 kg/h
Massenstrom luftseitig 8'880 kg/h
Zulufttemperatur $+32\text{ °C}$
Wassertemperaturen Vorlauf 50 °C , Rücklauf 30 °C
- Gesucht: Lufterhitzerleistung $Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$
Luft Eintrittszustand in den Lufterhitzer $\vartheta_E = \underline{\hspace{2cm}}$
 $x_E = \underline{\hspace{2cm}}$
- Gegeben: Aussenluftzustand $+35\text{ °C}$, 30 % r.F., 12'100 m³/h
Zulufttemperatur $+18\text{ °C}$
Entfeuchtungsleistung 27.19 kg/h
- Gesucht: absolute Feuchtigkeitsdifferenz $\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
Enthalpiedifferenz $\Delta h = \underline{\hspace{2cm}}$
Oberflächentemperatur $\vartheta_O = \underline{\hspace{2cm}}$
Luftkühlerleistung $Q_{LK} = \underline{\hspace{2cm}}$
- Gegeben: Luftzustand vor dem Befeuchter $+34\text{ °C}$, 10 % r.F., 1'370 m³/h
Lufttemperatur nach dem Befeuchter $+20\text{ °C}$
Temperatur Befeuchtungswasser $+14.8\text{ °C}$
- Gesucht: absolute Feuchtigkeitsdifferenz $\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
Befeuchtungswirkungsgrad $\eta_{BEF} = \underline{\hspace{2cm}}$
Massenstrom Befeuchtungswasser $m_D = \underline{\hspace{2cm}}$

Gegeben:	Eintrittszustand Befeuchter	+25 °C, 10 % r.F., 9'000 m ³ /h
	Austrittszustand Befeuchter	45 % r.F.
	Dampftemperatur	250 °C
Gesucht:	absolute Feuchtedifferenz	$\Delta x = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom Wasserdampf	$\dot{m}_D = \underline{\hspace{2cm}}$

Zusatzaufgaben mit verknüpften Vorgänge im hx-Diagramm

Gegeben:	Aussenluft	-11 °C, 75 % r.F., 2'000 m ³ /h
	Umluft	+18 °C, 60 % r.F., 4'500 m ³ /h
	Luftzustand nach dem Dampfbefeuchter	+23 °C, 60 % r.F.
	Wärmeinhalt Dampf	3'000 kJ/kg
Gesucht:	Mischtemperatur AUL+UML	$\vartheta_M = \underline{\hspace{2cm}}$
	Austrittstemperatur Lufterhitzer	$\vartheta_{ZUL} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Lufterhitzerleistung	$Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom Befeuchtungswasser	$\dot{m}_D = \underline{\hspace{2cm}}$

Gegeben:	Luftzustand vor dem Kühler	+31 °C, 30 % r.F., 700 m ³ /h
	Austrittstemperatur Kühler	+15 °C
	Luftzustand nach dem Nachwärmer	+30 °C, 25 % r.F.
Gesucht:	Luftkühlerleistung	$Q_{LK} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Entfeuchtungsleistung	$\dot{m}_E = \underline{\hspace{2cm}}$
	Heizleistung Nachwärmer	$Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$

Gegeben:	Abluftzustand vor der WRG	+30 °C, 36 % r.F., 5'400 m ³ /h
	Abluftzustand nach der WRG	+20 °C, 50 % r.F.
	WRG-System	Plattentaucher
	Aussenluftzustand vor der WRG	-8 °C, 40 % r.F., 5'100 m ³ /h
	Zulufttemperatur nach dem Lufterhitzer	+39 °C
	Zuluftfeuchtigkeit nach dem Befeuchter	45 % r.F.
	Befeuchtungs-System	adiabatisch, h konstant
Gesucht:	Aussenluftzustand nach der WRG	$\vartheta_{ZUL} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Lufterhitzerleistung	$Q_{LE} = \underline{\hspace{2cm}}$
	Massenstrom Befeuchtungswasser	$\dot{m}_D = \underline{\hspace{2cm}}$