

FUKTIG LUFT

- **Fuktig luft = torr luft + vatten** $\Rightarrow m = m_a + m_v$
- **Fuktighetsgrad** ω anger massan vatten *per kg torr luft*

$$\omega = m_v/m_a \Rightarrow m = m_a(1 + \omega)$$

Normalt är $\omega \ll 1$ ($\omega \sim 0.02$)

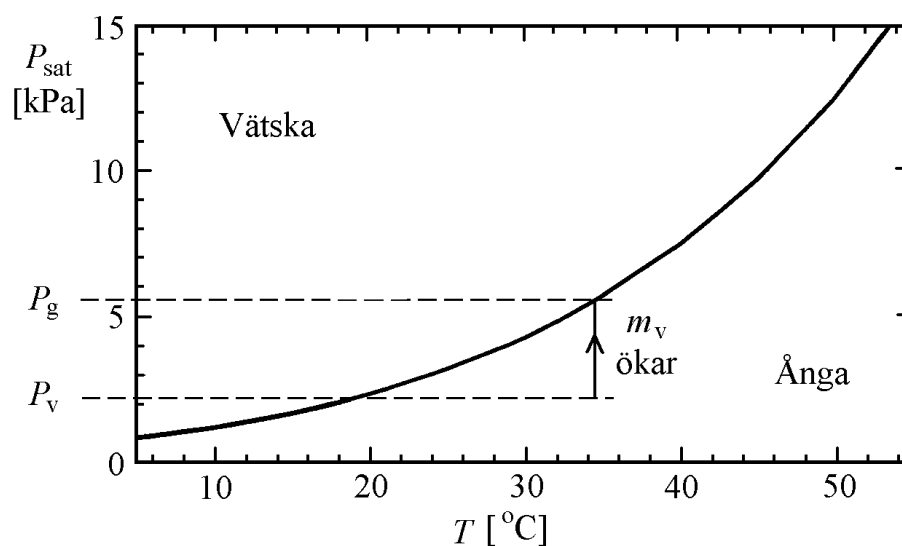
- Luftkonditionering, luftbehandling:

$$-10^\circ\text{C} \leq T \leq +50^\circ\text{C}, P \simeq 101 \text{ kPa} \Rightarrow$$

Både vattenånga (mättad eller överhettad) och torr luft kan betraktas som *perfekta gaser* (ideal gasblandning).

- Antag att trycket är konstant ($P \simeq 101 \text{ kPa}$). Daltons lag \Rightarrow

$$P = P_a + P_v = \textit{konst.}$$



- **Relativ fuktighet** ϕ anger förhållandet mellan faktisk och maximal vattenmängd som en luftmassa kan hålla vid ifrågavarande temperatur. Vid ideal gasblandning är detta lika med förhållandet mellan vattnets faktiska partialtryck, P_v , och vattnets mättnadstryck vid ifrågavarande temperatur, $P_g = P_{\text{sat}@T}$.

$$\phi = m_v/m_g = P_v/P_g \Rightarrow 0 \leq \phi \leq 1$$

FUKTIG LUFT = VANLIG LUFT

Samband mellan ω och ϕ

$$\left. \begin{array}{l} P_v \mathcal{V} = m_v R_v T \\ P_a \mathcal{V} = m_a R_a T \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_v}{P_a} = \frac{R_v}{R_a} \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_v}{R_a} \omega = \frac{M_a}{M_v} \omega \simeq \frac{29}{18} \omega, \text{ d.v.s.}$$

$$\omega = \frac{18.015}{28.97} \frac{P_v}{P - P_v} = 0.622 \frac{\phi P_g}{P - \phi P_g}$$

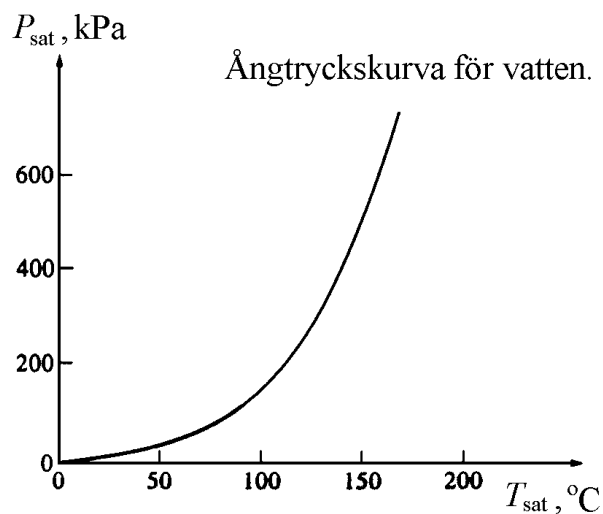
Vid mättningstillstånd ($\phi = 1$):

$$\omega_s = 0.622 \frac{P_g}{P - P_g}$$

P_g är mättnadstrycket vid ifrågavarande temperatur, $P_g = P_{\text{sat}@T}$.
Inom $0^\circ\text{C} \leq T \leq 95^\circ\text{C}$ gäller följande empiriska¹ formel:

$$P_{\text{sat}@T} = \exp \left(16.64 - \frac{4026}{T[^\circ\text{C}] + 235} \right) \quad [\text{kPa}]$$

T [$^\circ\text{C}$]	P_{sat} [kPa]	ω_s (1 atm)
0	0.61	0.004
10	1.23	0.008
20	2.34	0.015
30	4.25	0.027
40	7.39	0.049
50	12.4	0.086
60	19.9	0.152



¹Inom $-60^\circ\text{C} \leq T \leq 0.01^\circ\text{C}$ gäller $P_{\text{sat}@T} = a \exp \left(\frac{22.45 T [^\circ\text{C}]}{T [^\circ\text{C}] + 272.5} \right)$, där $a = 0.6112 \text{ kPa}$.

ENTALPI VID FUKTIG LUFT

Den torra luftmassan (eller det torra luftflödet) är oftast konstant. Låt därför *alla* massberoende storheter per massenhet vara uttryckta i *per kg torr luft*, speciellt då för *entalpi*:

$$H = m_a h = m_a h_a + m_v h_v \Rightarrow h = h_a + \omega h_v$$

Torr luft: sätt $h_a = 0$ vid $T = 0^\circ\text{C}$, d.v.s.

$$h_a = c_{p_a} T = 1.005 T \quad [\text{kJ/kg}]$$

Vatten: sätt $h_v = 0$ vid $T = 0^\circ\text{C}$ och *vätska*

$$\text{Ånga: } h_v = h_{\text{fg}}(0^\circ\text{C}) + c_{p_v} T = 2500.9 + 1.82 T \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\text{Vätska: } h_v = c_{p_w} T = 4.20 T \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\text{Is } (T < 0^\circ\text{C}): h_v = -h_{\text{sf}} + c_{\text{is}} T = -334 + 2.10 T \quad [\text{kJ/kg}]$$

Sammanfattning (entalpin i [kJ/kg *torr luft*], temp. i [$^\circ\text{C}$])

1. Vatten endast i gasform (vattenånga):

$$h = 1.005 T + \omega (2500.9 + 1.82 T)$$

Speciellt mättad ånga:

$$h_s = 1.005 T + \omega_s (2500.9 + 1.82 T)$$

2. Vatten även i vätskeform (dimma):

$$h = h_s + (\omega - \omega_s) 4.20 T$$

3. Vatten även i fast form d.v.s. som is/snö ($T < 0^\circ\text{C}$):

$$h = h_s + (\omega - \omega_s) (-334 + 2.10 T)$$

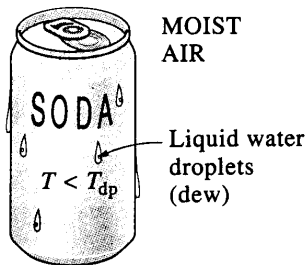
DAGGPUNKT

Betrakta en fuktig luftmassa vid visst konstant totalt tryck. Om luften kyls vid konstant vatteninnehåll kommer till slut vatten i vätskeform (dagg) att utfällas. Detta sker vid *daggpunkten* T_{dp} .

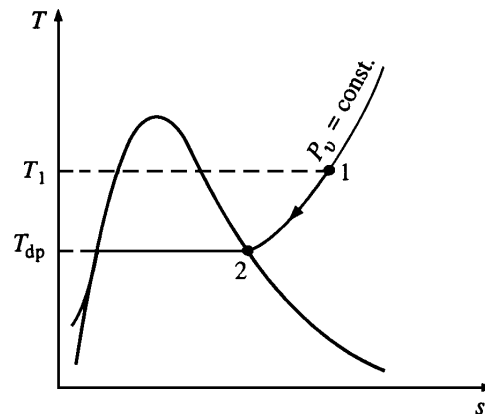
Konstant vatteninnehåll $\Rightarrow \omega = m_v/m_a = konst.$

Konstant totalt tryck $\Rightarrow P = P_a + P_v = konst.$

$$\omega = \frac{0.622P_v}{P - P_v} \Rightarrow P_v = konst. \Rightarrow \boxed{T_{dp} = T_{sat@P_v}}$$



When the temperature of a cold drink is below the dew-point temperature of the surrounding air, it “sweats.”



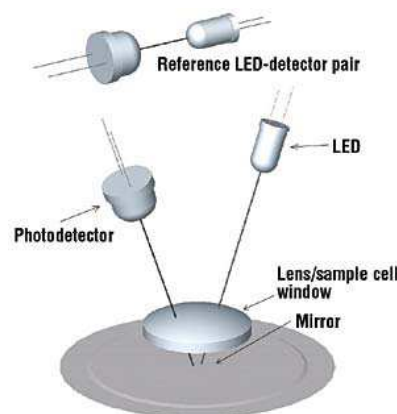
Constant-pressure cooling of moist air and the dew-point temperature on the T - s diagram of water.

Exempel. $T = 18^\circ\text{C}$, $\phi = 60\%$; daggpunkt $T_{dp} = ?$

$$P_v = \phi P_{sat@T}, P_{sat@18^\circ\text{C}} = \exp(16.64 - 4026/253) \text{ kPa} = 2.07 \text{ kPa} \Rightarrow P_v = 1.24 \text{ kPa}, T_{dp} = \left(\frac{4026}{16.64 - \ln 1.24} - 235\right)^\circ\text{C} = 10.1^\circ\text{C}.$$

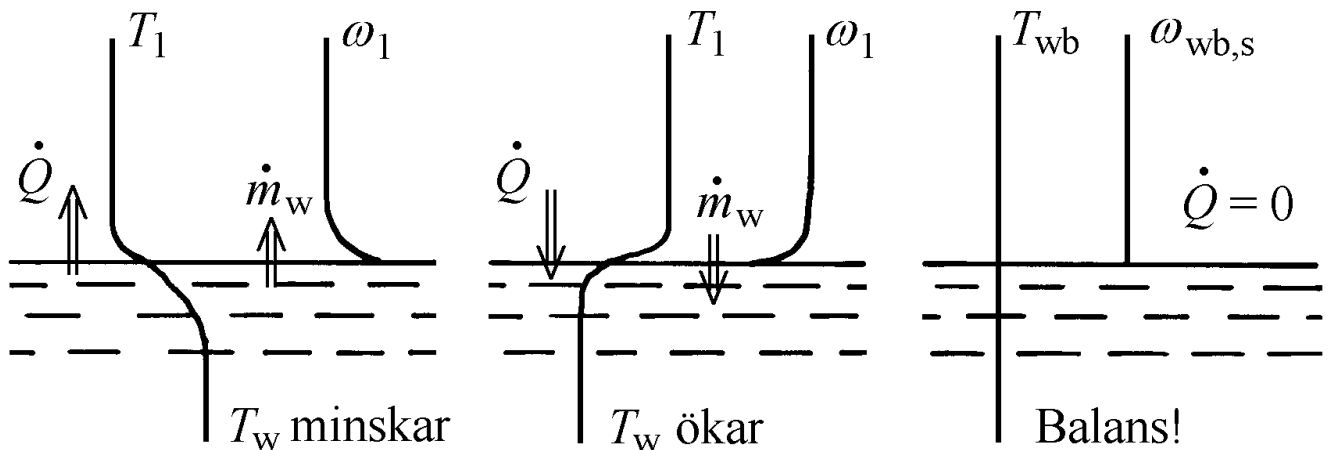
Daggpunktshygrometer (Dew Point Hygrometer, DPH sensor):

En spegel som från början är i termisk jämvikt med omgivande luft (temperatur T) kyls successivt via en termoelektrisk kylenhet. Omgivande luft drivs långsamt förbi spegeln, som är belyst med en laserdiод (LED). En fotodetektor fångar upp det reflekterade ljuset. När spegelytans temperatur når daggpunkten (temperatur T_{dp}) utfälls små daggdroppar som sprider det reflekterade ljuset, vilket kraftigt minskar signalen från fotodetektorn. Via en återkopplad digital reglerenhet kan spegelns temperatur hållas vid daggpunkten T_{dp} , som liksom T mäts m.h.a. en noggrann platina-resistans-termometer.



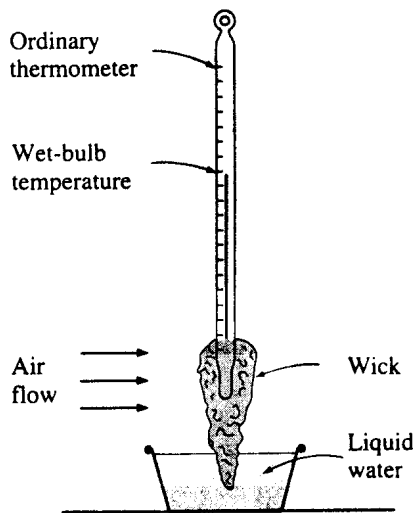
KYLGRÄNS — VÅT TEMPERATUR

Betrakta fuktig, omättad luft som strömmar kontinuerligt över en vattenyta där vattnet initialt har temperaturen T_w . Den inkommande luftens temperatur är $T_1 \neq T_w$ och dess fuktighetsgrad är ω_1 . Vid ytan utjämnas temperaturen till T_g och luften blir mättad, $\omega = \omega_{gs}$.

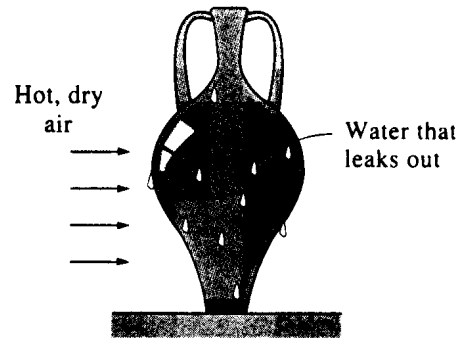


Om processen får fortgå kommer vattnet och den utgående *mättade* luften till slut att anta en viss temperatur — den s.k. **kylgränsen** alt. **våta temperaturen**, T_{wb} (eng. *wet-bulb temperature*).

Tillämpningar: psykrometer, förångningskylning, ...



A simple arrangement to measure the wet-bulb temperature.



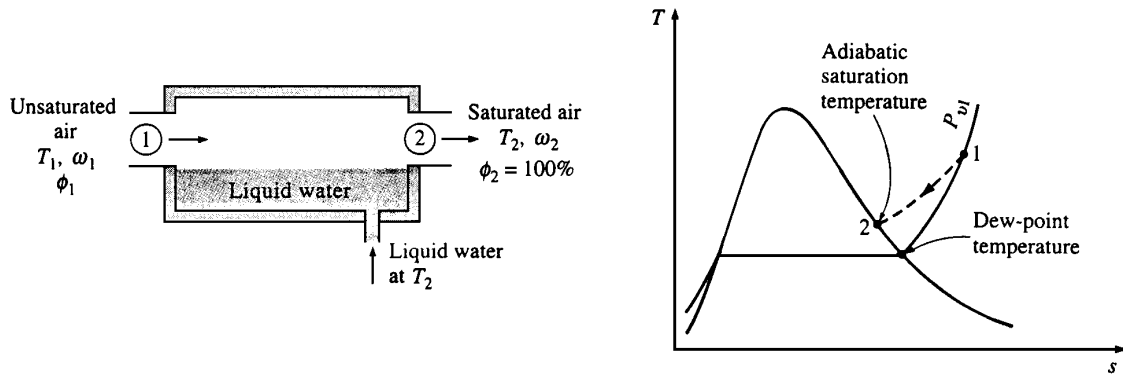
Water in a porous jug left in an open, breezy area cools as a result of evaporative cooling.

$$P \approx 101 \text{ kPa} \Rightarrow$$

$$T_{wb} \simeq \text{adiabatisk mättnadstemperatur}$$

ADIABATISK MÄTTNADSTEMPERATUR

Approximera processen som *adiabatisk*.



$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{a1} &= \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \\ \omega_1 \dot{m}_{a1} + \dot{m}_f &= \omega_2 \dot{m}_{a2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{m}_f = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_f h_{f2} = \dot{m}_{a2} h_2 \quad \text{där } h_{f2} = c_{pw} T_2 \Rightarrow$$

$$h_1 = h_2 - (\omega_2 - \omega_1) c_{pw} T_2$$

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= c_{pa} T_1 + \omega_1 (h_{fg0} + c_{pv} T_1) \\ h_2 &= c_{pa} T_2 + \omega_2 (h_{fg0} + c_{pv} T_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\omega_1 = \frac{c_{pa} (T_2 - T_1) + \omega_2 [h_{fg0} - T_2 (c_{pw} - c_{pv})]}{h_{fg0} + c_{pv} T_1 - c_{pw} T_2}$$

där $h_{fg0} = 2500.9 \text{ kJ/kg}$ samt

$$\omega_2 = \frac{0.622 P_{\text{sat}@T_2}}{P - P_{\text{sat}@T_2}}$$

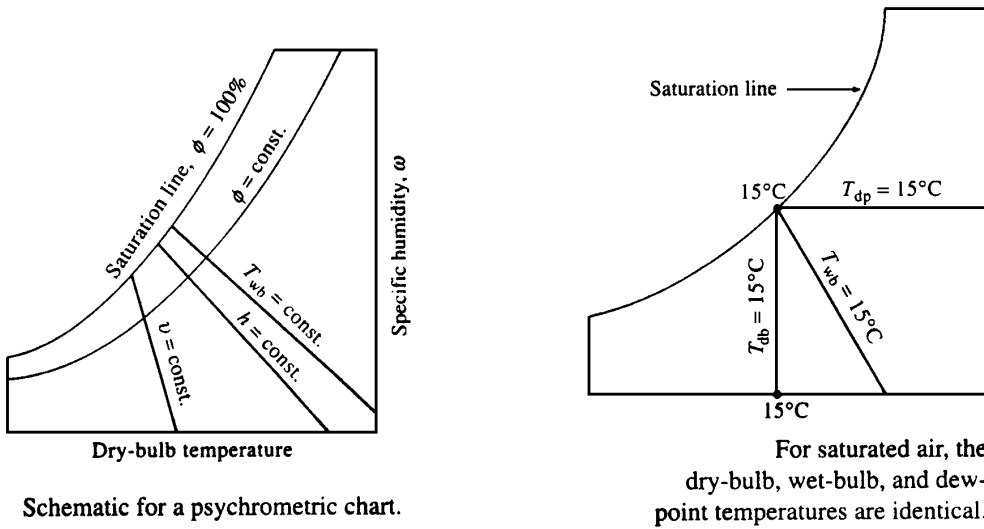
$$c_{pa} = 1.005, \quad c_{pw} = 4.20, \quad c_{pv} = 1.82 \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$T_2 =$ **adiabatisk mätnadstemperatur**

Då trycket ligger runt 1 atm (= 101.325 kPa) visar experiment att T_2 ligger mycket nära kylgränsen T_{wb} , d.v.s. ovanstående formler kan användas för att beräkna T_{wb} .

FUKTIG LUFT (DIAGRAM)

Psykrometriskt diagram (eng. *psychrometric chart*) — gäller endast vid ett visst (totalt) tryck.

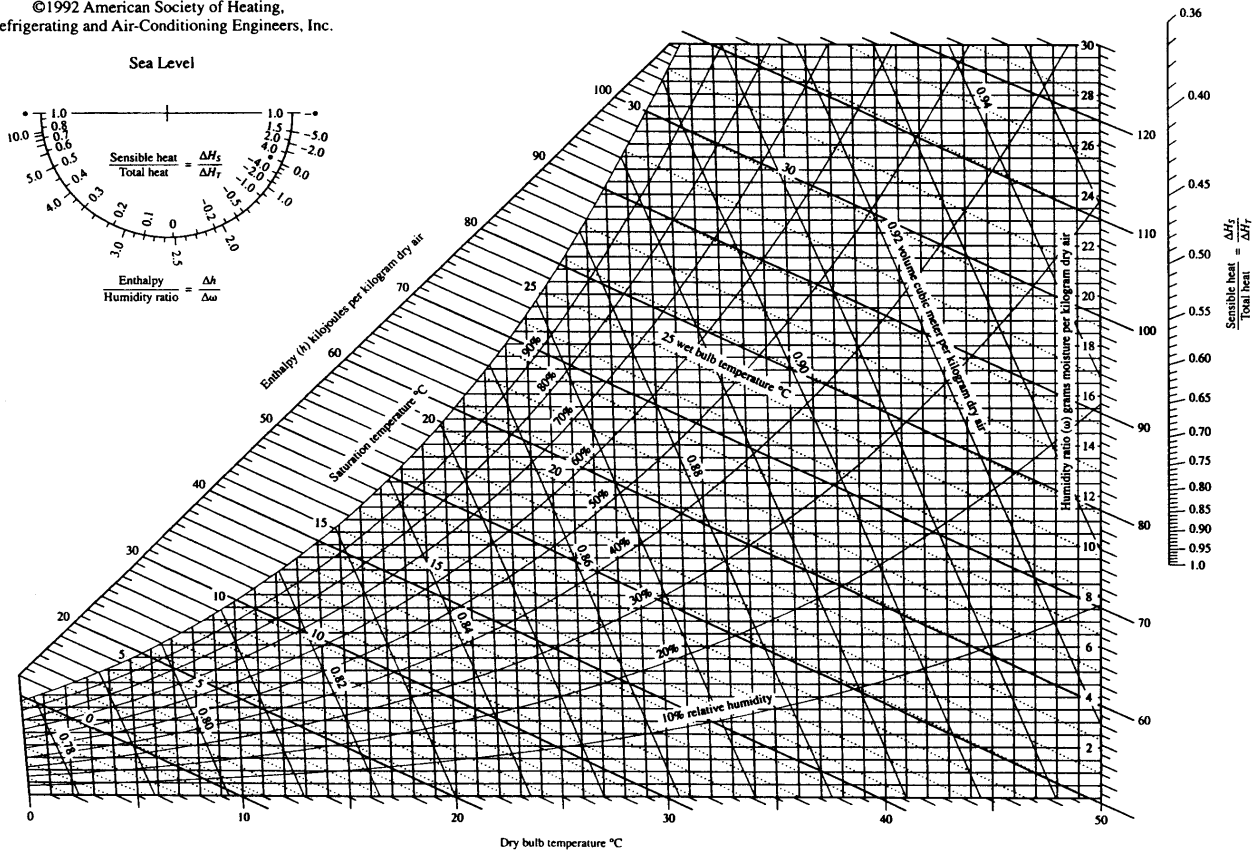


Arbetsdiagrammet nedan (Fig. A-31) gäller vid
 $P = 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$.

ASHRAE Psychrometric Chart No. 1
 Normal Temperature
 Barometric Pressure: 101.325 kPa



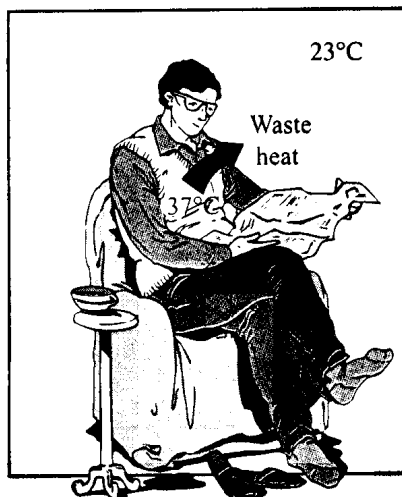
©1992 American Society of Heating,
 Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.



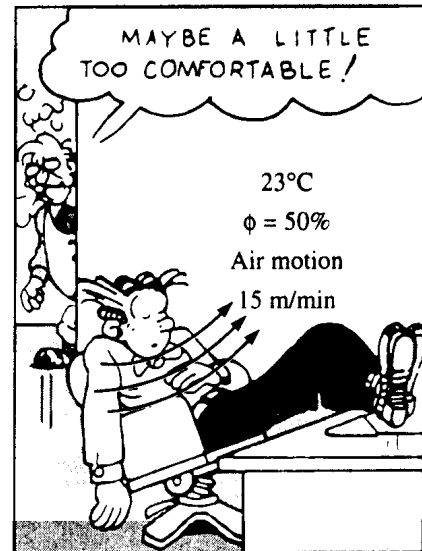
KOMFORT — LUFTKONDITIONERING

- Vad är “mänsklig komfort”?

1. **Temperatur** för kallt – lagom – för varmt, $T_{\text{opt}} \simeq 23^\circ\text{C}$
2. **Fuktighet** för torrt – lagom – för fuktigt, $\phi_{\text{opt}} \simeq 50\%$
3. **Luftrörelser** för stilla – lagom – dragigt, $V_{\text{opt}} \simeq 25 \text{ cm/s}$



A body feels comfortable when it can freely dissipate its waste heat, and no more.



A comfortable environment.

- Kroppen en värmemaskin som ständigt måste göra sig av med sitt spillvärme. Kroppen känner sig komfortabel då den fritt och utan besvär kan avyttra precis detta värme. Värmet per tids- och massenhet beror framförallt på typ av aktivitet.

Aktivitet	Spillvärme
Sömn	1 – 1.5 W/kg
Vila, stillasittande arbete	1.5 – 2 W/kg
Lätt motion	2 – 3 W/kg
Lätt till hårt kroppsarbete	2 – 5 W/kg
Elitidrott ex. maraton	5 – 8 W/kg

Ett komfortabelt inomhusklimat kräver ofta **luftkonditionering**.

VÄRMEUTBYTE, TORKNING

Betrakta en omätnad fuktig luftmassa ($P = konst. \Rightarrow q = \Delta h$)

VÄRMEUTBYTE — vatteninnehållet ändras inte, $\omega = konst.$



Entalpin ökar, temperaturen ökar, relativa fuktigheten minskar.



Entalpin minskar, temperaturen minskar, relativa fuktigheten ökar.

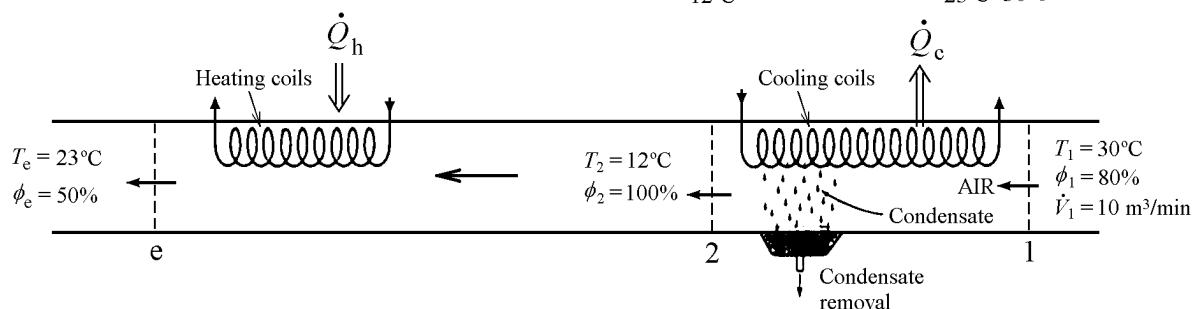
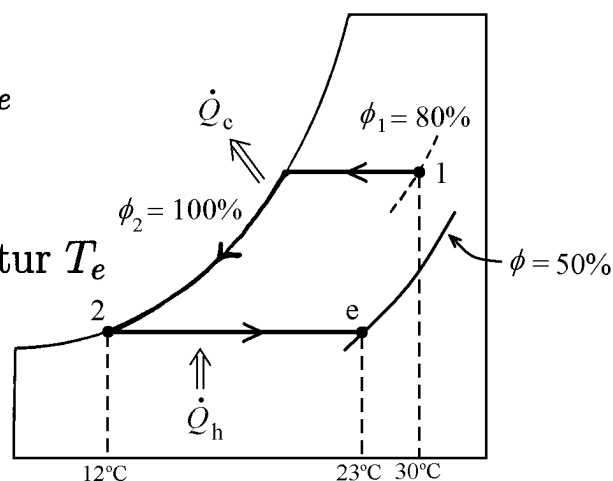
Till slut utfaller vatten i vätskeform (vid daggpunkten T_{dp}). Om vattenet bortförs minskar vatteninnehållet, ω minskar. Då kylningen avbryts har alltså luften blivit torrare men också kallare.

TORKNING

1. KYLNING till $T_2 < T_{dp1}$, $\omega_2 = \omega_e$

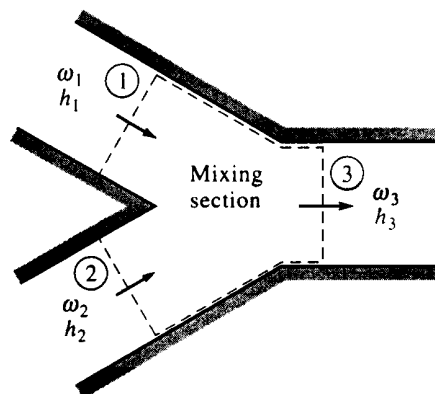
AVSKILJNING av kondensat

2. VÄRMNING till önskad temperatur T_e



BLANDNING AV LUFTSTRÖMMAR

Förutsättningar: Adiabatisk, stationär process, inget tekniskt arbete, försumbara ändringar i kinetisk och potentiell energi; *massflödet in* = *massflödet ut* samt *entalpiflödet in* = *entalpiflödet ut*. Blandning av två fuktiga luftströmmar:

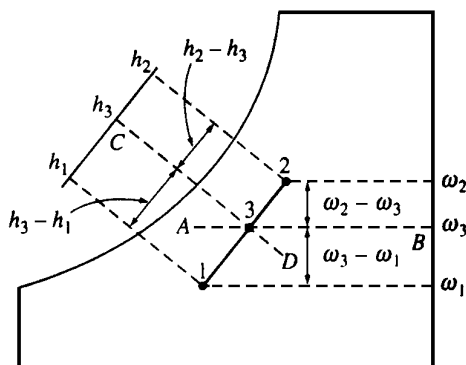


$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{a_3} &= \dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2} \\ \dot{m}_{v_3} &= \dot{m}_{v_1} + \dot{m}_{v_2} \\ \dot{m}_v &= \omega \dot{m}_a \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_3 = \frac{\omega_1 \dot{m}_{a_1} + \omega_2 \dot{m}_{a_2}}{\dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2}}$$

$$\dot{m}_{a_3} h_3 = \dot{m}_{a_1} h_1 + \dot{m}_{a_2} h_2 \Rightarrow h_3 = \frac{\dot{m}_{a_1} h_1 + \dot{m}_{a_2} h_2}{\dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2}}$$

I det psykrometriska diagrammet ligger blandningspunkten längs förbindelselinjen mellan tillstånd 1 och 2 (längs *blandningslinjen*).

When two airstreams at states 1 and 2 are mixed adiabatically, the state of the mixture lies on the straight line connecting the two states.



FUKTIG LUFT — HUR INVERKAR TRYCKET?

Givet: $T = 23^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$ samt

(a) $P = 97.3 \text{ kPa}$, (b) $P = 101.3 \text{ kPa}$ (1 atm), (c) $P = 105.4 \text{ kPa}$

Sökt: ω , v , T_{dp} , T_{wb} samt entalpin h

I fall (b) kan det psykrometriska diagrammet användas, dock ej i fall (a) och (c) ty $P \neq 101.3 \text{ kPa}$.

$$v = \mathcal{V}/m_a = R_a T/P_a, P_a = P - \phi P_{\text{sat}@T}, R_a = 287.0 \text{ J}/(\text{kg K}).$$

(a) Formler: $\omega = 0.00911$, $v = 0.886$, $T_{\text{dp}} = 12.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb}} = 16.1^\circ\text{C}$,
 $h = 46.3$

(b) Diagram: $\omega = 0.0088$, $v = 0.85$, $T_{\text{dp}} = 12^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb}} \simeq 16.2^\circ\text{C}$,
 $h \simeq 45.5$

Formler: $\omega = 0.00876$, $v = 0.851$, $T_{\text{dp}} = 12.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb}} = 16.2^\circ\text{C}$,
 $h = 45.4$

(c) Formler: $\omega = 0.00840$, $v = 0.817$, $T_{\text{dp}} = 12.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb}} = 16.3^\circ\text{C}$,
 $h = 44.5$

Observera att daggpunkten T_{dp} är oberoende av trycket vid konstant temperatur och relativ fuktighet ($T_{\text{dp}} = T_{\text{sat}@P_v}$, $P_v = \phi P_{\text{sat}@T}$).

Slutsats (i detta fall):

$$P = 1 \text{ atm} \pm 4\% \Rightarrow \omega \pm 4\%, v \pm 4\%, T_{\text{wb}} \pm 0.1^\circ\text{C}, h \pm 2\%$$

vilket i många fall kan vara tillräckligt noggranna värden. Störst inverkan på fuktighetsgrad och volymitet, övrig inverkan av ungefär samma storleksordning som avläsningsnoggrannheten i det psykrometriska diagrammet (gäller dock inte generellt).

- Vid problemlösning (alt. tentamen): Om angivet tryck $\neq 1 \text{ atm}$ (101.3 kPa) är det underförstått att formler skall användas.