

Dokumentation

Berechnungsprogramm feuchte Luft

lkr
(Luft-Kennwert-Rechner)

basierend auf

Mollier-hx-Diagramm für feuchte Luft

Programmierung: Noah Pflugradt

fachl. Beratung: Dr.-Ing. habil. Manfred Lehnguth
Dr.-Ing. Ulrich Schirmer

April 2009

Inhaltsverzeichnis

1 Thermodynamische Grundlagen

- 1.1 Zustandsgrößen feuchter Luft
 - 1.1.1 Luftzustände im hx-Diagramm
 - 1.1.2 Berechnungsgleichungen und verwendete Stoffe
 - 1.1.3 Zustands-Berechnungen
 - 1.1.4 Eingabegrenzen der Zustandswerte
- 1.2 Zustandsänderungen feuchter Luft
 - 1.2.1 Heizung
 - 1.2.2 Kühlung
 - 1.2.3 Mischung
 - 1.2.4 Adiabate Befeuchtung
 - 1.2.5 Befeuchtung mit Dampf
 - 1.2.6 Befeuchtung mit Wasser
 - 1.2.7 Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung
 - 1.2.8 Adsorptive Entfeuchtung

2 Programm-Bedienung

- 2.1 Installation und Start
- 2.2 Datei-Menü
 - 2.2.1 Bild speichern
 - 2.2.3 Drucken
 - 2.2.4 Beenden
- 2.3 Zeichnen
- 2.4 Ansicht
 - 2.4.1 Zoom rückgängig
 - 2.4.2 Modus
 - 2.4.3 Diagramm anpassen
 - 2.4.4 Diagramm neu zeichnen
- 2.5 Punkte
 - 2.5.1 Alle Punkte entfernen
 - 2.5.2 Punkte-Verwaltung
 - 2.5.3 Nächste Zahl
 - 2.5.4 Zustand berechnen
 - 2.5.5 Punkte-Verwaltung
- 2.6 Zustandsänderungen
 - 2.6.1 Zustand wählen
 - 2.6.2 Heizung
 - 2.6.3 Kühlung
 - 2.6.4 Mischung
 - 2.6.5 Adiabate Befeuchtung

- 2.6.6 Dampfbefeuchtung
- 2.6.7 Befeuchtung mit Wasser
- 2.6.8 Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung
- 2.6.9 Adsorptive Entfeuchtung

- 2.7 Extras

- 2.7.1 Einstellungen

3 Informationen zum Programm

- 3.1 Rechentechnische Informationen

- 3.2 Wärmetechnische Informationen

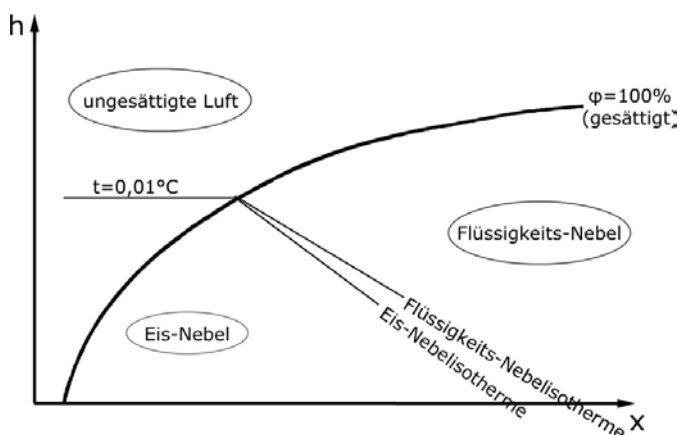
1 Thermodynamische Grundlagen

Bei der Benutzung des vorliegenden Rechenprogramms ist stets der Sachverstand der thermodynamischen Zusammenhänge gefragt, um Fehleingaben und Fehlinterpretationen von Berechnungsergebnissen auszuschließen. Im Folgenden werden dazu auch einige Hinweise gegeben.

1.1 Zustandsgrößen feuchter Luft

Für technische Belange kann feuchte Luft rechnerisch mit hinreichender Genauigkeit als ein Gemisch idealer Gase (trockene Luft + Wasserdampf) betrachtet werden, wobei in diesem Gemisch Luft - Wasserdampf nicht jedes beliebige Mischungsverhältnis (wie im Gemisch zweier tatsächlicher Gase) möglich ist. Die maximal mögliche Wasserdampfmenge ist in Abhängigkeit der Temperatur begrenzt. Im Nebelgebiet ist zusätzlich noch flüssiges Wasser (in Form von Wassertröpfchen o. a.) oder Eis vorhanden.

1.1.1 Luftzustände im h,x-Diagramm



Für die Berechnung im Programm wurde festgelegt:

- $t \geq 0,01 \text{ °C}$: Flüssigkeits-Nebel
- $t < 0,01 \text{ °C}$: Eis-Nebel

1.1.2 Berechnungsgleichungen und verwendete Stoffwerte

- Feuchtegehalt x und Massenbilanz:

$$x = \frac{m_w}{m_L} \quad [\text{kg Feuchtigkeit} / \text{kg trockene Luft}]$$

m_w ... Masse der Feuchtigkeit [kg]

m_L Masse der trockenen Luft [kg]

(im Rechenprogramm ist der Feuchtegehalt x stets in g/kg einzugeben)

Massenbilanz:

$$m_f = m_L + m_w = m_L \cdot (1 + x) \quad m_f \text{ ... Masse der feuchten Luft [kg]}$$

$$m_L = \frac{m_f}{1 + x}$$

- **Dampfdruck p_D** der feuchten Luft:

$$p = p_L + p_D$$

p Gesamtdruck der feuchten Luft [Pa]

(im Rechenprogramm wird p in bar eingegeben)

p_L ... Teildruck der trockenen Luft [Pa]

p_D ... Teildruck des Dampfes in der feuchten Luft [Pa]

$$p_D = \frac{p \cdot x}{0,622 + x}$$

(mit: $R_L = 287,08 \text{ J/(kg K)}$... Gaskonstante der tr. Luft

$R_D = 461,53 \text{ J/(kg K)}$... Gaskonstante des Dampfes

$$\rightarrow \frac{R_L}{R_D} = \frac{M_D}{M_L} = 0,622$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

M_D ... Molmasse des Dampfes

M_L ... Molmasse der tr. Luft)

• im Sättigungszustand:

$$\rightarrow \begin{matrix} p_D = p_{D,S} \\ x = x_S \end{matrix}$$

$p_{D,S}$... Dampfdruck im Sättigungszustand [Pa]

- **relative Feuchtigkeit φ :**

$$\varphi = \left(\frac{p_D}{p_{D,S}} \right)_T \cdot 100 [\%]$$

- **Sättigungs-Dampfdruck $p_{D,S}$:**

Die folgenden Gleichungen $p_{D,S} = f(t)$ sind aus Glück, Bernd: Zustands- und Stoffwerte, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2. Auflage, 1991 übernommen, wobei auf die unterschiedlichen Geltungsbereiche zu achten ist.

$$p_{D,S} = 611 \exp (- 4,909965 \cdot 10^{-4} + 0,08183197 t - 5,552967 \cdot 10^{-4} t^2 - 2,228376 \cdot 10^{-5} t^3 - 6,211808 \cdot 10^{-7} t^4) \text{ [Pa]}$$

(Geltungsbereich: $-20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,00% (?))

$$p_{D,S} = 611 \exp (- 1,91275 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} t - 2,939 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,841 \cdot 10^{-7} t^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} t^4) \text{ [Pa]}$$

(Geltungsbereich: $0,01 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 100 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

$$p_{D,S} = 611 \exp (6 \cdot 10^{-5} + 7,13274 \cdot 10^{-2} t - 2,581631 \cdot 10^{-4} t^2 + 6,311955 \cdot 10^{-7} t^3 - 7,167112 \cdot 10^{-10} t^4) \text{ [Pa]}$$

(Geltungsbereich: $100 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

Die Sättigungstemperatur $t_s = f(p_{D,S})$ berechnet sich dann umgedreht nach Glück aus

$$t_s = -61,125785 + 8,1386 (\ln p_{D,S}) - 7,422003 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^2 + 6,283721 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^3 - 2,7237063 (\ln p_{D,S})^4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

(Geltungsbereich: $103 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 611,2 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,13%)

$$t_s = -63,16113 + 5,36859 (\ln p_{D,S}) + 0,973587 (\ln p_{D,S})^2 - 7,38636 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^3 + 4,81832 (\ln p_{D,S})^4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

(Geltungsbereich: $611,2 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 101320 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,41%)

$$t_s = -228,146 + 31,97037 (\ln p_{D,S}) + 1,153295 (\ln p_{D,S})^2 - 0,27847109 (\ln p_{D,S})^3 + 1,319026 \cdot 10^{-2} (\ln p_{D,S})^4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

(Geltungsbereich: $101320 \text{ Pa} < p_{D,S} \leq 1555100 \text{ Pa}$, max. Fehler: 0,05%)

- Spez. Volumen v und Dichte ρ :

• ungesättigtes Gebiet:

$$v = \frac{V}{m_L} = (x + 0,622) \cdot R_D \cdot \frac{T}{p} \quad [\text{m}^3/\text{kg tr. Luft}] \quad V \dots \text{Volumen } [\text{m}^3]$$

$T \dots \text{absolute Temperatur } [\text{K}]$

$$\rho = \frac{m_f}{V} = \frac{1+x}{v} = \frac{1+x}{x+0,622} \cdot \frac{p}{R_D \cdot T} \quad [\text{kg feuchte Luft } / \text{m}^3]$$

• gesättigte Luft: $x = x_s$

$$\rightarrow v = v_s \quad \rho = \rho_s$$

• übersättigtes Gebiet (Nebelgebiet):

$$\text{exakt gilt: } v = \frac{V}{m_L} \quad V = m_L \cdot v_s + \Delta m_w \cdot v_w$$

$\Delta m_w \dots$ Masse der Flüssigkeitströpfchen (bzw. der Eispartikel)

$v_w \dots$ spez. Volumen der Wassertöpfchen (bzw. der Eispartikel)

$$v = v_s + \frac{\Delta m_w}{m_L} \cdot v_w$$

$$\rightarrow v = v_s + (x - x_s) \cdot v_w \quad [\text{m}^3/\text{kg tr. Luft}]$$

bei Vernachlässigung des Volumens der Wassertöpfchen bzw. Eispartikel:

$$(x - x_s) \cdot v_w \rightarrow 0^1$$

$$\rightarrow v \approx v_s = (x_s + 0,622) \cdot R_D \cdot \frac{T}{p} \quad [\text{m}^3/\text{kg tr. Luft}]$$

und

$$\rho = \frac{1+x}{v} \quad [\text{kg f. Luft}/\text{m}^3]$$

¹⁾ Bei z..B. $(x - x_s) = 10 \text{ g/kg}$ und $v_w = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ ergibt die Vernachlässigung eine v -Abweichung von $0,00001 \text{ m}^3/\text{kg}$

- **Spez. Enthalpie h:**

generell gilt:

$$h = h_L + x \cdot h_W \quad [\text{kJ/kg tr. Luft}]$$

h_L ... spez. Enthalpie der trockenen Luft

h_W ... spez. Enthalpie der Feuchtigkeit

• ungesättigtes Gebiet:

$$h = h_L + x \cdot h_D$$

h_D ... spez. Enthalpie des Dampfes

Dafür kann vereinfacht geschrieben werden:

$$h = \bar{c}_{p,L} \cdot t + x (r_o + \bar{c}_{p,D} \cdot t) \quad [\text{kJ/kg tr. Luft}]$$

$r_o = 2501 \text{ kJ/kg}$... spez. Verdampfungsenthalpie bei 0°C

$\bar{c}_{p,L}$ mittlere spez. Wärmekapazität der trockenen Luft
zwischen 0 und $t^\circ\text{C}$ $[\text{kJ}/(\text{kg K})]$

$\bar{c}_{p,D}$ mittlere spez. Wärmekapazität von Wasserdampf
zwischen 0 und $t^\circ\text{C}$ $[\text{kJ}/(\text{kg K})]$

Im vorliegenden Rechenprogramm wurden die in Häußler, W.: Lufttechnische Berechnungen im Mollier-i,x-Diagramm, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden 1969, angegebenen Werte für $\bar{c}_{p,L}$ und $\bar{c}_{p,D}$ verwendet:

t	$\bar{c}_{p,L}$	$\bar{c}_{p,D}$
-20	1,0055	1,857
0	1,0056	1,858
20	1,0058	1,860
40	1,0062	1,863
60	1,0065	1,865
80	1,0071	1,868
100	1,0077	1,872
120	1,0085	1,875
140	1,0094	1,879
160	1,0103	1,883
180	1,0114	1,887
200	1,0126	1,892

Das Programm sucht für eine gegebene Temperatur die zwei nächsten Werte aus der Tabelle und berechnet die benötigten spez. Wärmekapazitäten dann über folgende Geraden-Interpolation:

$$\bar{c}_p = \frac{(-y_1 \cdot t_2 - y_2 \cdot t + y_2 \cdot t_1 + y_1 \cdot t)}{-t_2 + t_1}$$

wobei y entweder $\bar{c}_{p,L}$ oder $\bar{c}_{p,D}$ ist

• Flüssigkeits-Nebelgebiet:

$$h = h_L + x_S \cdot h_D + (x - x_S) \cdot h_{W,f}$$

$h_{W,f}$... spez. Enthalpie von (flüssigem) Wasser

$$h = \bar{c}_{p,L} \cdot t + x_S (r_o + \bar{c}_{p,D} \cdot t) + (x - x_S) \cdot c_{p,W} \cdot t$$

$c_{p,W} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$... spez. Wärmekapazität von Wasser

• Eis-Nebelgebiet:

$$h = h_L + x_S \cdot h_D + (x - x_S) \cdot h_E$$

h_E ... spez. Enthalpie von Eis

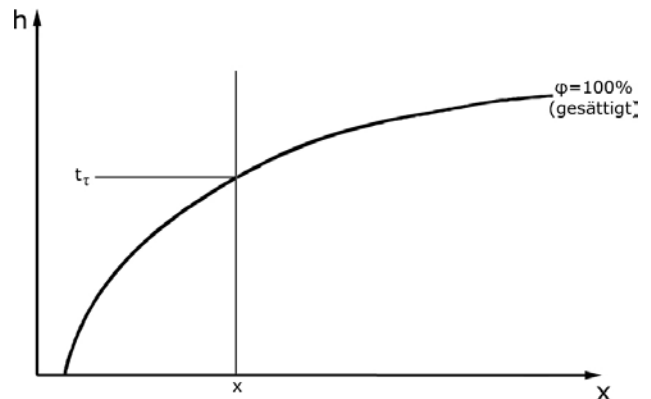
$$h = \bar{c}_{p,L} \cdot t + x_S (r_o + \bar{c}_{p,D} \cdot t) + (x - x_S) \cdot (-r_{\text{Sch}} + c_{p,E} \cdot t)$$

$r_{\text{Sch}} = 333,4 \text{ kJ/kg}$... spez. Schmelzenthalpie von Eis

$c_{p,E} = 2,05 \text{ kJ}/(\text{kg K})$... spez. Wärmekapazität von Eis

- **Taupunkttemperatur t_τ :**

$$t_\tau = t_s \quad (\text{bei: } x_s = x \quad \text{bzw.} \quad p_{D,S} = p_D)$$



- **Kühlgrenztemperatur t_{KG} :**

Die Kühlgrenztemperatur eines Luftzustandes ergibt sich durch den Schnittpunkt der verlängerten Nebelisotherme durch den Luftzustand Z mit der Sättigungslinie ($\varphi = 100\%$ -Linie) im h,x -Diagramm und kann nur iterativ ermittelt werden. Exakterweise ist zwischen den Flüssigkeits-Nebelisothermen (bei feuchtnasser Oberfläche) und den Eis-Nebelisothermen (über Eisoberfläche) zu unterscheiden.

• über feuchtnasser Oberfläche ($t \geq 0,01 \text{ °C}$):

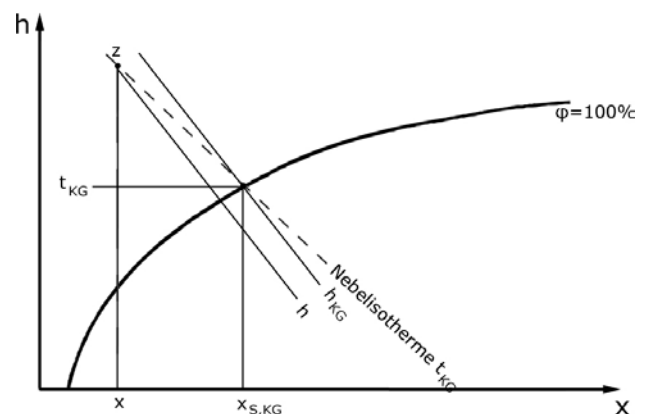
Neigung der Nebelisothermen gegenüber den $h = \text{konst.}$ -Linien:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_t = h_w = c_{p,w} \cdot t$$

$$\rightarrow \frac{h_{KG} - h}{x_{S,KG} - x} = h_{w,KG} = c_{p,w} \cdot t_{KG}$$

$$\rightarrow h_{KG} = h + (x_{S,KG} - x) \cdot c_{p,w} \cdot t_{KG}$$

($\rightarrow$ Berechnung von t_{KG} über Iteration ²⁾)



²⁾ Berechnungsschritte:

- Berechnung von h und x des Zustands Z
- t_{KG} -Annahme $\rightarrow x_{S,KG} = f(t_{KG})$
 $h_{KG} = f(t_{KG}, x_{S,KG})$ bzw. $f(t_{KG}, \varphi = 100\%)$
- h_{KG} -Berechnung nach obiger Gleichung und Vergleich

• über Eisoberfläche ($t < 0,01 \text{ °C}$):

Neigung der Eis-Nebelisothermen gegenüber den $h = \text{konst.}$ -Linien:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_t = h_E = c_{p,E} \cdot t - r_{Sch}$$

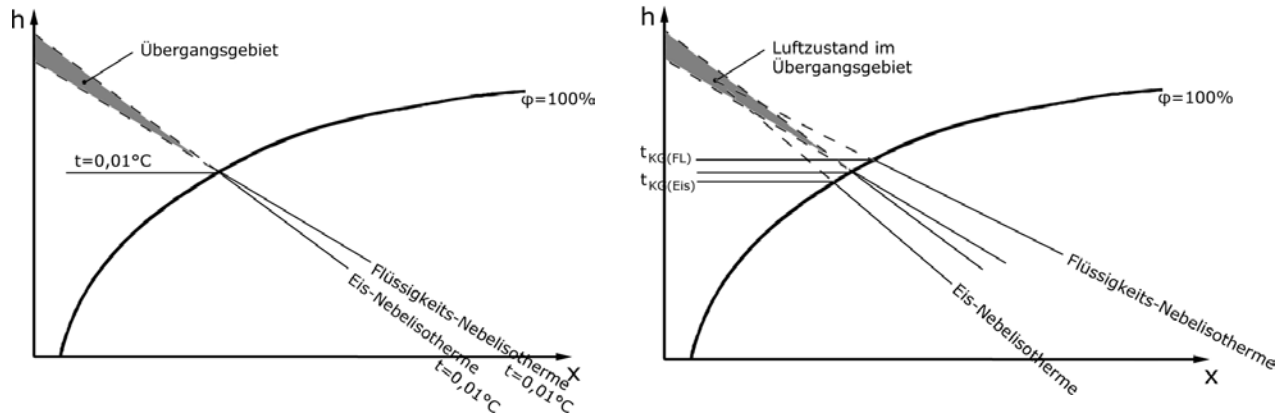
$$\rightarrow \frac{h_{KG} - h}{x_{S,KG} - x} = h_{E,KG} = c_{p,E} \cdot t_{KG} - r_{Sch}$$

$$\rightarrow h_{KG} = h + (x_{S,KG} - x) \cdot (c_{p,E} \cdot t_{KG} - r_{Sch})$$

($\rightarrow$ Berechnung von t_{KG} über Iteration)

Achtung !

In einem Luftzustands-Übergangsgebiet (s. Bilder) sind beide Kühlgrenztemperatur-Ermittlungen zulässig. Welche davon die richtige Nebelisotheorie zur Berechnung ist,



hängt davon ab, ob die Oberfläche (z.B. vom Feuchtkugelthermometer eines Psychrometers) feuchtnass oder vereist ist (es kann auch beides eintreten). Testrechnungen ergaben, dass die Kühlgrenztemperaturen, die mit den Eis-Nebelisotheimen ermittelt wurden, bis zu maximal 0,75 K unter denen lagen, die mit den Flüssigkeits-Nebelisotheimen ermittelt wurden (bei $p = 1$ bar). Meist ist der Unterschied aber erheblich geringer.

Da das Rechenprogramm im Übergangsgebiet nicht selbst entscheiden könnte, welche der beiden Fälle richtig ist, wurde auf die gesamte Kühlgrenztemperatur-Ermittlung mit den Eis-Nebelisotheimen verzichtet. Alle Kühlgrenztemperaturen - auch bei Lufttemperaturen unter 0°C - werden also nur über die Flüssigkeits-Nebelisotheimen-Methode berechnet !

Wenn wirklich die tatsächlichen Eis-Kühlgrenztemperaturen benötigt werden, so lassen sich diese auch über eine manuelle Iterationsrechnung unter zu Hilfenahme oben genannter Gleichungen ermitteln.

1.1.3 Zustands-Berechnungen

Für die komplette Berechnung eines Luftzustands ist neben dem Luftdruck p stets die Eingabe von zwei Zustandsgrößen und eventuell einer Mengenangabe (Masse bzw. Massenstrom trockener bzw. feuchter Luft oder Volumen bzw. Volumenstrom) erforderlich.

Die möglichen Eingabe-Zustandsgrößen sind:

Lufttemperatur t	$[\text{°C}]$
Feuchtegehalt x	$[\text{g/kg tr. Luft}]$
Relative Feuchte φ	$[\%]$
spez. Enthalpie h	$[\text{kJ/kg tr. Luft}]$
spez. Volumen v	$[\text{m}^3/\text{kg tr. Luft}]$
Taupunkttemperatur t_t	$[\text{°C}]$
Kühlgrenztemperatur t_{KG}	$[\text{°C}]$
Dampfdruck p_D	$[\text{Pa}]$

Bei der Berechnung von Luftzuständen im Flüssigkeits- und Eisnebelgebiet sind einige Eingabe-Wertekombinationen nicht erlaubt. Sie führen zu falschen Ergebnissen.

- Im Flüssigkeits-Nebelgebiet sind nur folgende Eingabe-Kombinationen erlaubt:

- Temperatur t / Feuchtegehalt x
- Temperatur t / Enthalpie h
- Feuchtegehalt x / Enthalpie h
- Feuchtegehalt x / spez. Volumen v

(Die Eingabe-Kombination Temperatur t / spez. Volumen v würde als Ergebnis immer den gesättigten Zustand $\varphi = 100\%$ anzeigen !)

- Im Eis-Nebelgebiet sind nur zwei Eingabe-Kombinationen erlaubt:

- Temperatur t / Feuchtegehalt x
- Feuchtegehalt x / Enthalpie h

(Die Eingabe-Kombination Temperatur t / Enthalpie h ist nicht erlaubt, da es zwei Schnittpunkte der t - und h -Linien im h,x -Diagramm (im ungesättigten und im Eisnebel-Gebiet) gibt, und das Programm dann stets den Luftzustand im ungesättigten Gebiet errechnet)

Achtung!

Generell werden für Luftzustände im Nebelgebiet und für gesättigte Luft ($\varphi = 100\%$) keine Taupunkt- und Kühlgrenztemperaturen in der Ergebnisliste angegeben.

1.1.4 Eingabegrenzen der Zustandswerte

In der folgenden Übersicht sind die für das vorliegende Rechenprogramm festgelegten Eingabegrenzen angegeben.

Luftdruck p ³⁾	(0,05) 0,8 1,2 (10)	bar
Lufttemperatur t ⁴⁾	- 20 100	°C
Taupunkttemp. t_τ ⁴⁾	- 20 100	°C
Kühlgrenztemp. t_{KG} ⁴⁾	- 20 100	°C
Feuchtegehalt x ⁵⁾	0 3000	g/kg
Rel. Feuchte φ ⁵⁾	0 100	%
Dampfdruck p_D ⁶⁾	0 < p	Pa

³⁾ Luftdruck p :

Da die unter 1.2 angegebenen $\bar{c}_{p,L}$ -Werte (vermutlich) exakterweise nur für einen Luftdruck von $p = 1$ bar (genauer: $p_L = 1$ bar) gelten, sind die berechneten Enthalpiewerte der feuchten Luft auch nur für einen engeren Druckbereich (hinreichend) exakt. Im Programm wurde hierfür ein Bereich von $p = 0,8 \dots 1,2$ bar angenommen. Bei größeren Luftdruckabweichungen wird in der Ergebnisliste auf dem Bildschirm mit roter Anzeige des Luftdrucks auf die Fehlermöglichkeit hingewiesen. (Bei sehr großen Drücken weicht die Luft auch immer stärker vom idealen Gaszustand ab.)

Eingabewerte von $p < 0,05$ bar bzw. $p > 10$ bar werden sofort auf 0,05 bar bzw. 10 bar korrigiert.

⁴⁾ Bei Temperatur-Eingaben außerhalb dieser Grenzen erfolgt sofort eine Fehlermeldung.

⁵⁾ Eingabewerte von x bzw. φ außerhalb dieser Grenzen werden sofort auf die angegebenen Grenzwerte korrigiert.

⁶⁾ Eingabewerte von p_D außerhalb dieser Grenzen werden sofort auf 0,0 Pa korrigiert bzw. durch eine Fehlermeldung angezeigt.

Achtung!

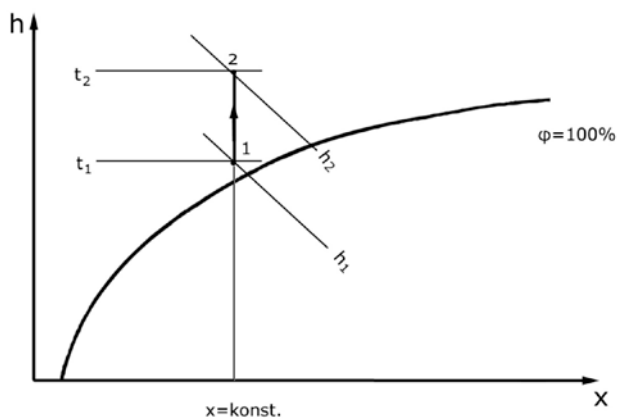
Auch bei Eingabe von einzelnen Werten innerhalb der angegebenen Grenzen können während der Berechnung Fehlermeldungen auftreten, wenn diese Werte im Widerspruch zu den anderen Eingaben stehen.

1.2 Zustandsänderungen feuchter Luft

Generell gilt: Ist der Luftdruck, bei dem die Zustandsänderung durchgeführt wird, $p \neq 1,000$ bar, so muss dieser Luftdruck zunächst über "Ansicht" - "Diagramm anpassen" in die sich öffnende Tabelle eingegeben werden.

Nach der Berechnung einer Zustandsänderung wird diese durch "ok" gespeichert und ins h,x-Diagramm eingetragen (vorausgesetzt, das Diagramm wurde vorher vom Bereich her richtig angepasst).

1.2.1 Heizung (siehe auch 2.6.2)



Heizenergie:

$$Q_H = m_L (h_2 - h_1) \quad [\text{kJ}]$$

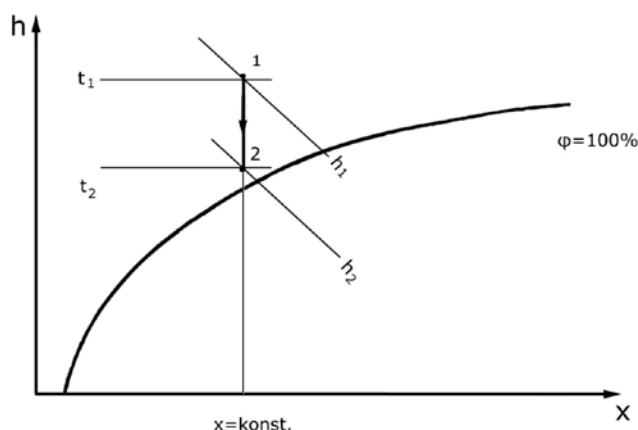
Heizleistung:

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{m}_L \cdot (h_2 - h_1)}{3600} \quad [\text{kW}]$$

Nach Eingabe (einschließlich Berechnung) eines (bzw. Auswahl eines bereits vorhandenen) Anfangszustands kann entweder die Heizleistung $\dot{Q}_H$ bzw. Heizenergie Q_H oder der Endzustand der Zustandsänderung über t_2 , Δt , h_2 , Δh bzw. ϕ_2 ausgewählt werden.

Achtung! • Fälschlicherweise eingegebene Größen $\dot{Q}_H$ bzw. $Q_H < 0$, $\Delta t < 0$ bzw. $\Delta h < 0$ werden vom Programm sofort auf 0,00 gesetzt

1.2.2 Kühlung (siehe auch 2.6.3)



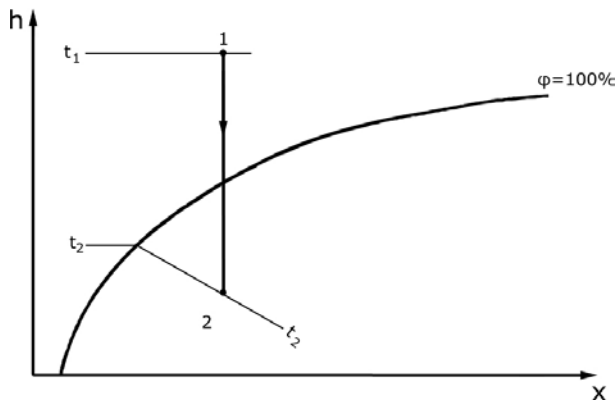
Kühlenergie:

$$Q_K = m_L (h_1 - h_2) \quad [\text{kJ}]$$

Kühlleistung:

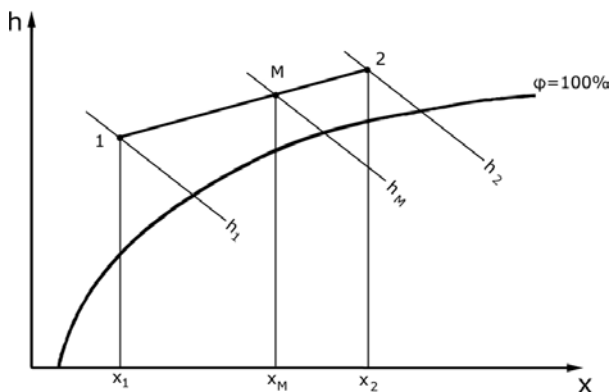
$$\dot{Q}_K = \frac{\dot{m}_L \cdot (h_1 - h_2)}{3600} \quad [\text{kW}]$$

Bei Abkühlung bis ins Nebelgebiet geht die Berechnung davon aus, dass das ausgefallene Wasser die gleiche Temperatur wie die abgekühlte Luft besitzt (d.h. $t_w = t_2$):



Sollte das bei der Abkühlung ausgefallene Wasser eine andere (bekannte) Temperatur haben, so lassen sich die Abweichungen unter zu Hilfenahme von Einzelpunktberechnung o. ä. ermitteln. Üblicherweise sind diese Unterschiede vernachlässigbar klein.

1.2.3 Mischung (siehe auch 2.6.4)



$$m_{L1} + m_{L2} = m_{LM}$$

$$x_M = \frac{m_{L1} \cdot x_1 + m_{L2} \cdot x_2}{m_{L1} + m_{L2}}$$

$$h_M = \frac{m_{L1} \cdot h_1 + m_{L2} \cdot h_2}{m_{L1} + m_{L2}}$$

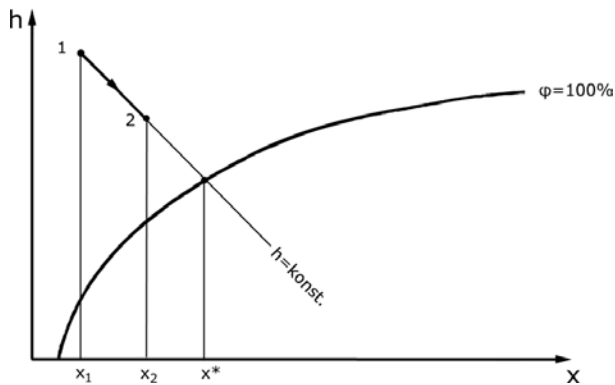
Hier lassen sich zwei Varianten berechnen:

- Eingabe (bzw. Auswahl) von Zustand 1 und Zustand 2
→ Berechnung von Mischzustand M
- Eingabe (bzw. Auswahl) von Zustand 1 und Mischzustand M
→ Berechnung von Zustand 2

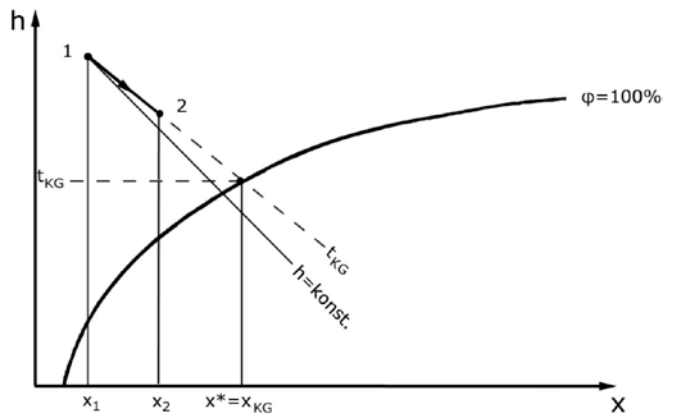
1.2.4 Adiabate Befeuchtung (siehe auch 2.6.5)

Die adiabate Befeuchtung arbeitet mit Versprühung von Wasser in die Luft mit Wassenumlauf. Im Beharrungszustand nimmt dabei das zu versprühende Wasser die Kühlgrenztemperatur der Luft an. Die Zustandsänderung der Luft erfolgt dann entlang der verlängerten Nebelisotherme t_{KG} . In der Praxis wird oft vereinfacht mit einer Zustandsänderung $h = \text{konst.}$ gerechnet. Beide Varianten lassen sich im Rechenprogramm wahlweise benutzen.

vereinfacht:



exakt: (übertrieben dargestellt)



- verdunstete Wassermenge:

$$\Delta m_w = m_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg}]$$

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/h}]$$

- Befeuchtungsgrad:

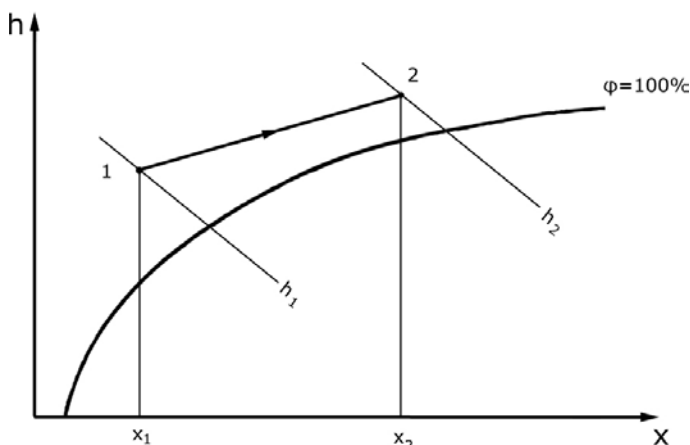
$$\eta_B = \frac{x_2 - x_1}{x^* - x_1}$$

Nach Eingabe (bzw. Auswahl) des Anfangszustands 1 und der Auswahl der Variante ($h = \text{konst.}$ oder $t_{KG} = \text{konst.}$) ist als weitere Eingabegröße die verdunstete Wassermenge $\Delta \dot{m}_w$ bzw. Δm_w , der Befeuchtungsgrad η_B oder eine Zustandsgröße des Endpunkts der Befeuchtung (x_2 bzw. Δx , t_2 , ϕ_2 , t_{r2} oder p_{D2}) auszuwählen.

Achtung! • Fälschlicherweise eingegebene Größen $\Delta \dot{m}_w$ bzw. $\Delta m_w < 0$ oder $\eta_B < 0$ werden vom Programm sofort auf 0,00 gesetzt.

Hinweis: Sollte der Endzustand der adiabaten Befeuchtung gegeben und der Anfangszustand gesucht sein, so lässt sich diese Zustandsänderung (mit $h = \text{konst.}$!) auch über die Zustandsänderung der adsorptiven Entfeuchtung (s. 1.2.8) berechnen.

1.2.5 Befeuchtung mit Dampf (siehe auch 2.6.6)



- Dampfmenge:

$$m_D = m_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg}]$$

$$\dot{m}_D = \dot{m}_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/h}]$$

- Enthalpie des Dampfes:

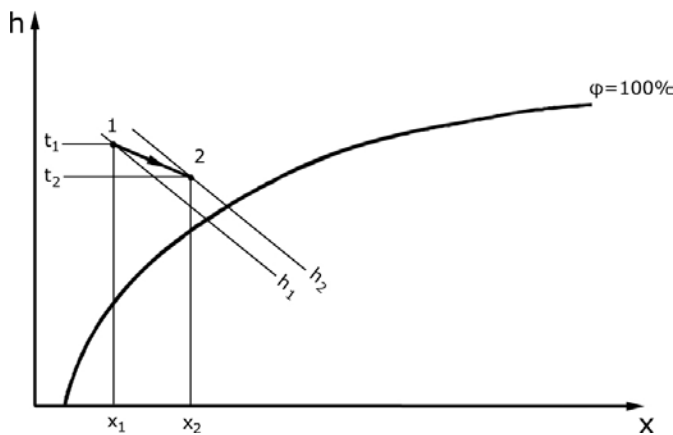
$$h_D = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \quad [\text{kJ/kg}]$$

Nach Eingabe (bzw. Auswahl) des Anfangszustands 1 der Luft kann zwischen der Eingabe der Dampfmenge $\dot{m}_D$ bzw. m_D und der Dampfenthalpie h_D oder des Endzustands 2 der Luftbefeuchtung ausgewählt werden.

Achtung! • Fälschlicherweise eingegebene Größen $\dot{m}_D$ bzw. $m_D < 0$ werden vom Programm sofort auf 0,00 gesetzt.

1.2.6 Befeuchtung mit Wasser (siehe auch 2.6.7)

Die Berechnung geht davon aus, dass das gesamte zugeführte (eingespritzte) Wasser in der Luft vollständig verdunstet.



- Wassermenge:

$$\Delta m_w = m_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg}]$$

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_L \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/h}]$$

- Enthalpie des Wassers:

$$h_w = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = c_{p,w} \cdot t_w \quad [\text{kJ/kg}]$$

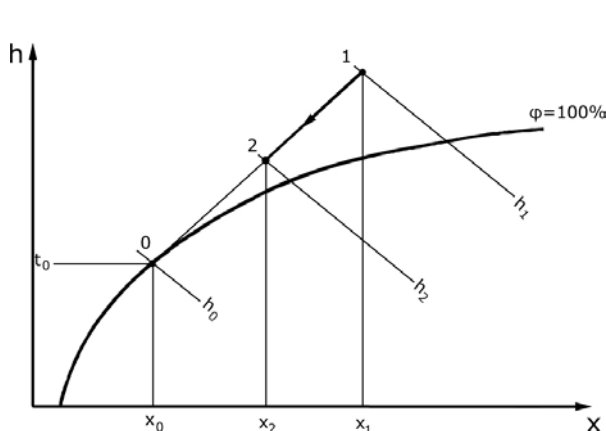
t_w ... Wassertemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Nach Eingabe (bzw. Auswahl) des Anfangszustands 1 der Luft kann zwischen der Eingabe der Wassermenge $\Delta \dot{m}_w$ bzw. Δm_w und der Wassertemperatur t_w oder des Endzustands 2 der Luftbefeuchtung ausgewählt werden.

- Achtung!
- Fälschlicherweise eingegebene Größen $\Delta \dot{m}_w$ bzw. $\Delta m_w < 0$ werden vom Programm sofort auf 0,00 gesetzt.
 - Bei Eingabewerten $t_w < 0^{\circ}\text{C}$ rechnet das Programm so, als wäre das Wasser unter 0°C noch flüssig.

1.2.7 Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung (siehe auch 2.6.8)

Die Berechnung erfolgt nach dem Bypassfaktor-Modell (s. Bild). Die tatsächlichen Entfeuchtungsprozesse in technischen Apparaten weichen davon meist stark ab!



t_0 ... Oberflächentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

- Bypassfaktor:

$$f_B = \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{h_2 - h_0}{h_1 - h_0}$$

- ausgefallene Wassermenge:

$$\Delta m_w = m_L \cdot (x_1 - x_2) \quad [\text{kg}]$$

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_L \cdot (x_1 - x_2) \quad [\text{kg/h}]$$

Nach Eingabe (bzw. Auswahl) des Anfangszustands 1 der Luft kann zwischen der Eingabe von drei Wertekombinationen ausgewählt werden:

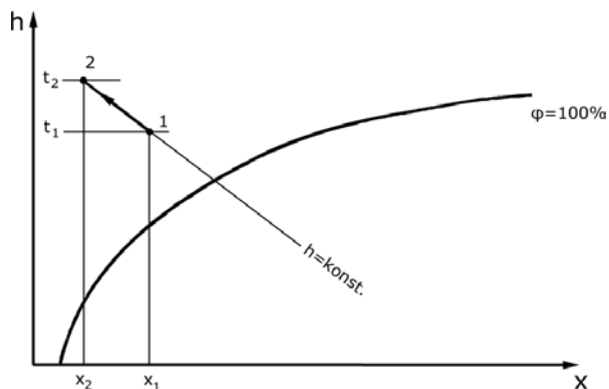
- Oberflächentemperatur t_O und Bypassfaktor f_B
- Bypassfaktor f_B und Endfeuchtegehalt x_2
- Oberflächentemperatur t_O und Endfeuchtegehalt x_2

Achtung! • Eingaben von $f_B < 0$ bzw. $f_B > 1,0$ werden vom Programm sofort auf 0,000 bzw. 1,000 gesetzt.

- Bei der letzten Wertekombination können durch zueinander widersprüchliche Eingaben von Zustand 1 sowie t_O und x_2 auch völlig andere Zustandsänderungen mit $f_B < 0$ oder $f_B > 1,0$ errechnet werden !! Hier ist der fachliche Sachverstand besonders gefragt.

1.2.8 Adsorptive Entfeuchtung (siehe auch 2.6.9)

Das Berechnungsmodell geht von einer Entfeuchtung mit $h = \text{konst.}$ aus. Der tatsächliche Entfeuchtungsprozess weicht mehr oder weniger davon ab. (Bei adiabatem Verlauf ist die Enthalpie des Endzustands durch die freigesetzte Bindungsenergie sogar größer als die des Anfangszustands.)



entzogene Wassermenge:

$$\Delta m_w = m_L \cdot (x_1 - x_2) \quad [\text{kg}]$$

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_L \cdot (x_1 - x_2) \quad [\text{kg/h}]$$

Nach Eingabe (bzw. Auswahl) des Anfangszustands 1 der Luft kann zwischen der Eingabe der der Luft entzogenen Wassermenge $\Delta \dot{m}_w$ bzw. Δm_w oder einer Zustandgröße des Endzustands 2 der Entfeuchtung (x_2 bzw. Δx , t_2 , ϕ_2 , t_{r2} oder p_{D2}) ausgewählt werden.

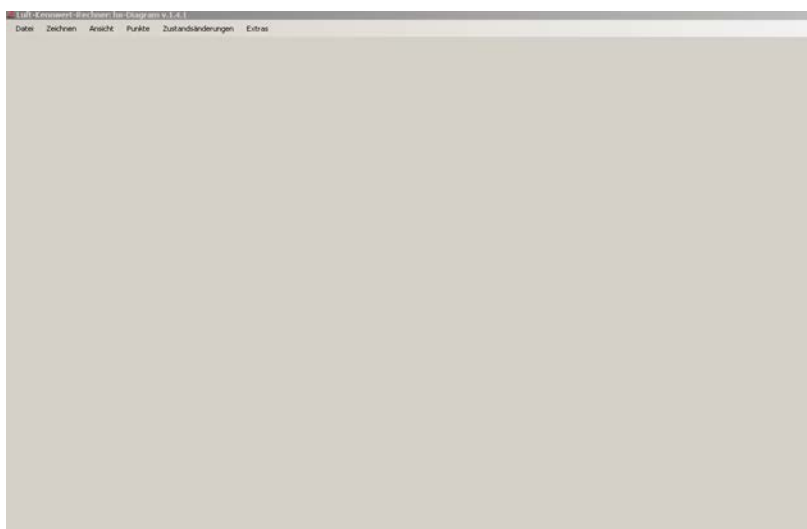
Achtung! • Fälschlicherweise eingegebene Größen von $\Delta \dot{m}_w$ bzw. $\Delta m_w < 0$ sowie $x_2 < 0$ werden vom Programm sofort auf 0,00 gesetzt.

2 Programm-Bedienung

2.1 Installation und Start

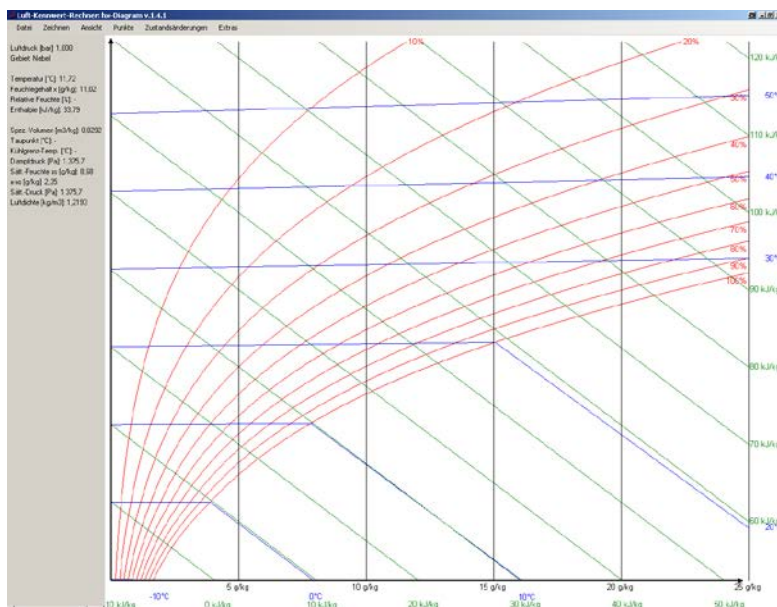
Eine Installation im eigentlichen Sinn ist nicht erforderlich. Die drei benötigten Programmbestandteile *LKR HX.exe*, *DFORRT.DLL* und *lkrdll.dll* werden in ein Verzeichnis eigener Wahl kopiert, aus dem die exe-Datei sofort gestartet werden kann. Es ist allerdings Voraussetzung, dass Microsoft.net Framework eingerichtet ist.

Nach Aufruf dieser Datei erscheint folgender Startbildschirm, auf dem die Option "Zeichnen" in der Menüleiste am oberen Fensterrand auszuwählen ist



(ab Version 1.4.2 erscheint Diagramm sofort)

Danach baut sich die Diagrammdarstellung auf.

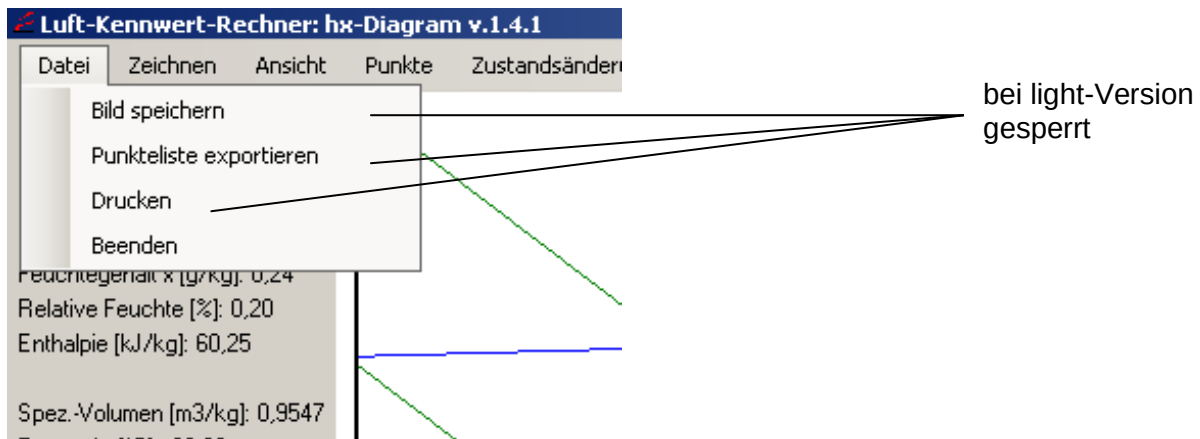


(bei light-Version ist der Wasserzeichentext „Technische Universität Chemnitz Technische Thermodynamik Ausbildungsmaterial“ hinterlegt)

Hier kann mit dem Mauszeiger über jeden beliebigen Punkt des Diagramms gefahren werden,

um auf der linken Seite des Fensters die Zustandswerte von genau dem Punkt, über dem der Mauszeiger steht, angezeigt zu bekommen („Ablesemodus“). Abhängig vom ausgewählten Modus (siehe weiter unten), können auch feste Punkte mit der Maus gesetzt oder in das Diagramm hineingezoomt werden.

2.2 Datei-Menü



2.2.1 Bild speichern

Speichert das momentan dargestellte Diagramm als BMP-Datei im auswählbaren Verzeichnis (Pfad) ab.

2.2.2 Punktliste exportieren

Speichert die momentan eingegebenen Punkte als Textdatei im auszuwählenden Pfad ab. Die Text-Datei hat dabei den folgenden beispielhaften Aufbau (Ausschnitt):

```

Bezeichnung ..... : 1

Luftdruck [bar] ..... : 1,000
Gebiet ..... : ungesaettigt

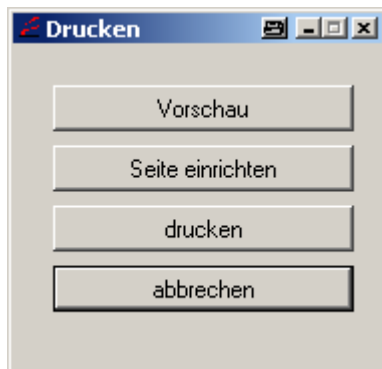
Eingabegrößen: ..... :
Feuchtegehalt x [g/kg] ..... : 7,64
Enthalpie [kJ/kg] ..... : 50,77

Temperatur [Grad C] ..... : 31,05
Feuchtegehalt x [g/kg] ..... : 7,64
Relative Feuchte [%] ..... : 26,94
Enthalpie [kJ/kg] ..... : 50,77

Spez.-Volumen [m³/kg] ..... : 0,8840
Taupunkt [Grad C] ..... : 9,86
Kuehlgrenz-Temp. [Grad C] ..... : 17,96
Dampfdruck [Pa] ..... : 1.213,3
Saett.-Feuchte xs [g/kg] ..... : 29,34
x-xs [g/kg] ..... : -
Saett.-Druck [Pa] ..... : 4.504,1
Luftsdichte [kg/m³] ..... : 1,1399
  
```

2.2.3 Drucken

Öffnet das Druckmenü, um die momentan eingegebenen Punkte auszudrucken.



Der Knopf "Vorschau" öffnet ein Druckvorschau-Fenster. "Seite einrichten" dient zur Festlegung von Seiten-Parametern, wie z.B. der Seitengröße, Seitenrand und ähnlichem. "Drucken" veranlasst die Ausgabe auf dem Drucker. Das Resultat sieht dann am Beispiel einer Mischung wie folgt aus:

Bezeichnung	Zustand 1	Zustand 2	Mischzustand
Luftdruck [bar]	1,000	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	Nebel	Nebel
Eingabegrößen:			
Temperatur [°C]	30,00	10,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	20,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	3,00	
Temperatur [°C]	30,00	10,00	12,65
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	20,00	17,50
Relative Feuchte [%]	37,30	-	-
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	30,04	36,47
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8229	0,8326
Taupunkt [°C]	13,88	-	-
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	-	-
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	1.226,9	1.462,5
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	7,73	9,23
x-xs [g/kg]	-	12,27	8,27
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	1.226,9	1.462,5
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,2395	1,2220
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	3,00	4,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	3,06	4,07
Volumen [m³/h]	0,88	2,47	3,33

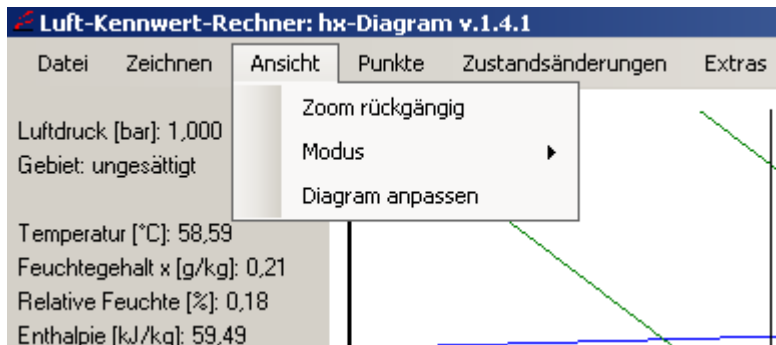
2.2.4 Beenden

Beendet die Programmausführung.

2.3 Zeichnen

Zeichnet das momentane Diagramm neu. Dies kann nützlich sein bei Darstellungsfehlern, wenn sich die Fenstergröße geändert hat, oder beim Programmstart.

2.4 Ansicht



2.4.1 Zoom rückgängig

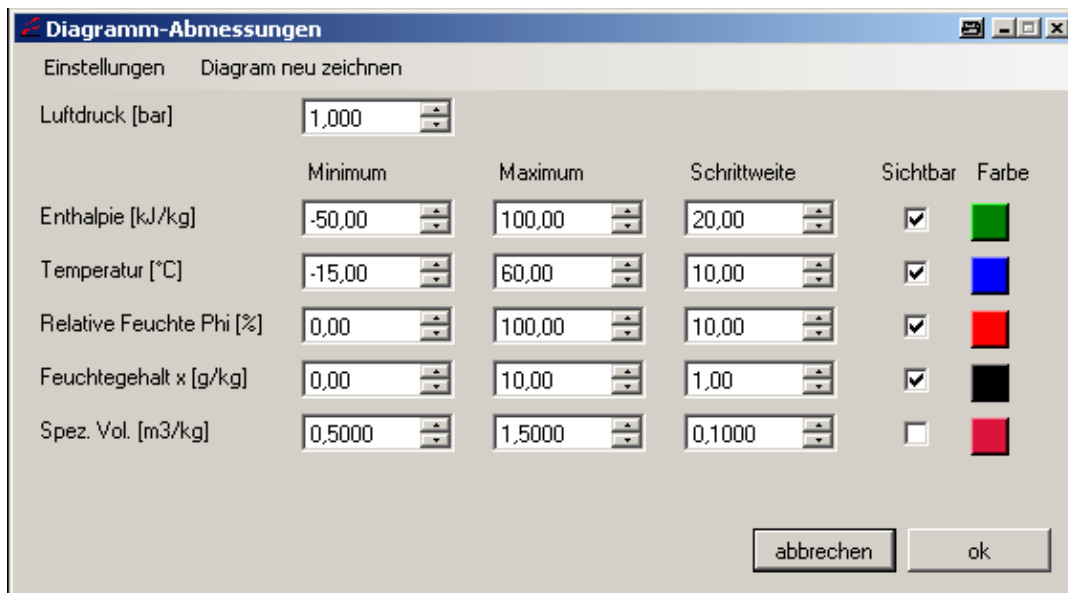
Eine (oder mehrere) vorher gewählte Zoomoperationen werden damit rückgängig gemacht.

2.4.2 Modus

Hier wird gewählt zwischen dem Modus zum Zoomen und dem Modus zum Punkte setzen. Im Punkte-Modus können jederzeit neue Punkte in das Diagramm gesetzt werden, indem mit der linken Maustaste in das Diagramm geklickt wird. Im Zoom-Modus wird bei gedrückter linke Maustaste ein Rahmen um den zu vergrößernden Bereich aufgezogen.

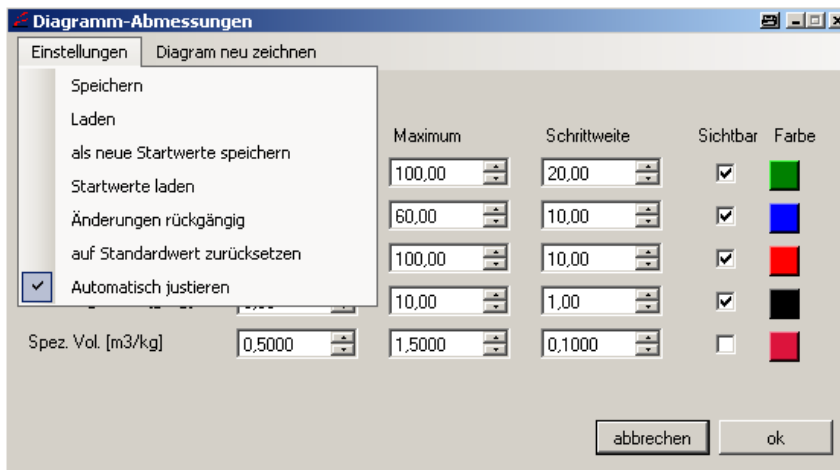
2.4.3 Diagramm anpassen

Öffnet ein neues Fenster zur Veränderung und Festlegung der Diagramm-Grenzen:



Es ist nicht möglich, Zahlenwerte einzugeben, die über den Gültigkeitsbereich des Berechnungsverfahrens hinausgehen.

Im Untermenü „Einstellungen“ sind weitere Vorgaben zum Umgang mit den Diagramm-Darstellungsgrenzen abrufbar.



Speichern

Speichert die momentan eingestellten Diagrammgrenzen in ein auswählbares Verzeichnis. Die dabei entstehende Datei ist nicht zum manuellen Editieren bestimmt.

Laden

Damit kann eine wie oben abgespeicherte Konfigurationsdatei geladen werden (man muss das Verzeichnis kennen).

als neue Startwerte speichern

Speichert die momentan eingestellten Werte als neue Werte für den Programmstart, so dass bei jedem Aufruf von LKR:HX diese Werte voreingestellt sind. Diese Datei wird im Systemverzeichnis abgelegt und ist nicht gezielt aufrufbar.

Startwerte laden

Lädt die momentan hinterlegten Startwerte wieder, falls man in der aktuellen Sitzung Änderungen am Diagramm vorgenommen hatte.

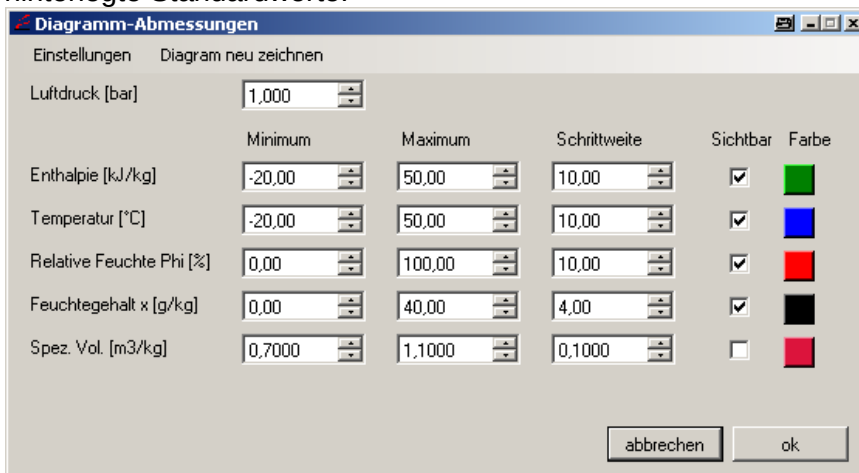
Änderungen rückgängig

Ruft die Diagramm-Werte wieder auf, die eingestellt waren, bevor das Fenster "Diagramm-Abmessungen" aufgerufen wurde.

auf Standardwerte zurücksetzen

Ruft unveränderlich im Programm vorgegebene Standardwerte (das sind gleichzeitig die Startwerte des Programms, ehe eigene festgelegt werden) auf, falls man keine sinnvolle Wertekombination mehr findet.

hinterlegte Standardwerte:

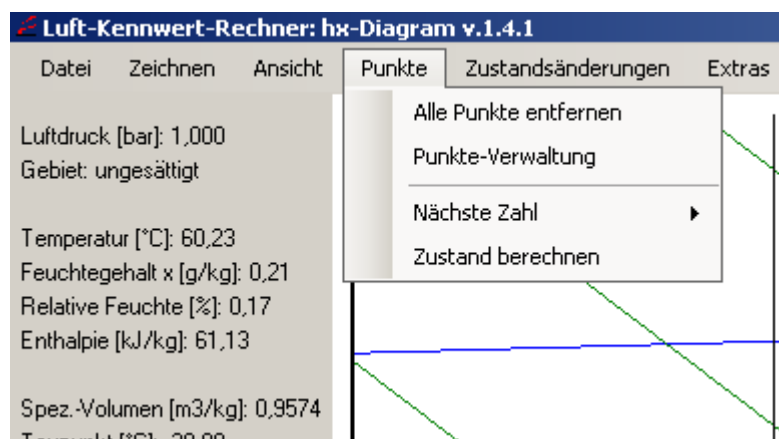


Automatisch justieren

Sorgt dafür, dass Temperatur, Enthalpie und spezifisches Volumen immer synchron verändert werden, wenn nur für eine der Größen neue Grenzen eingegeben werden, so dass alle drei jeweils das gesamte Diagramm in y-Richtung abdecken. Das Entfernen des Häkchens ermöglicht das zeichnen von individuell aufgeteilten Diagrammdarstellungen.

Das Untermenü „Diagramm neu zeichnen“ dient zur momentanen Sichtkontrolle von vorgenommenen Änderungen. Wenn nach „Diagramm neu zeichnen“ dieses Menü mit „abbrechen“ verlassen wird, so gilt noch die vorher im Programm hinterlegte Grenzentabelle, d.h. die Diagrammdarstellung kehrt wieder in die vor dem Aufruf des Menüpunktes „Diagramm-Abmessungen“ zurück. Sollen gewählte Änderungen gültig bleiben, so ist das Menü mit „ok“ zu verlassen.

2.5 Punkte



2.5.1 Alle Punkte entfernen

Löscht alle bisher gesetzten Punkte, sowohl aus der Liste als auch aus dem Diagramm.

2.5.2 Punkte-Verwaltung

siehe 2.5.5.

2.5.3 Nächste Zahl

Werden mit dem Mauszeiger Punkte in das Diagramm eingetragen, so wird jeder Punkt automatisch mit einer fortlaufenden Nummer versehen. Hiermit können diese Nummern individuell bearbeitet werden.

2.5.4 Zustand berechnen

Ruft das Fenster zur rechnerischen Ermittlung aller Zustandsgrößen eines Luftzustandes auf (erscheint in dieser oder angepasster Form auch an anderen Programmpunkten, wo Zustandsgrößen zu ermitteln sind).

Zustand berechnen

Bezeichnung: Zustand 1

Luftdruck [bar]: 1,000

Menge: 0,00

Wert 1: Temperatur [°C] 0,00

Wert 2: Feuchtegehalt x [g/kg] 0,00

Bezeichnung	
Luftdruck [bar]	1,000
Gebiet	Nicht bekannt
Eingabegrößen:	
Temperatur [°C]	0,00
Feuchtegehalt x [g/kg]	0,00
Temperatur [°C]	0,00
Feuchtegehalt x [g/kg]	0,00
Relative Feuchte [%]	0,00
Enthalpie [kJ/kg]	0,00
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,0000
Taupunkt [°C]	0,00
Kühlgrenz-Temp. [°C]	0,00
Dampfdruck [Pa]	0,0
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	-
x-xs [g/kg]	-
Sätt.-Druck [Pa]	0,0
Luftdichte [kg/m³]	0,0000

berechnen weiter abbrechen

Bezeichnung

Ermöglicht die Eingabe einer Punktbezeichnung. Diese ist frei wählbar und unbegrenzt lang. Sie wird sowohl im Diagramm neben dem Punkt als auch in der Punkteverwaltung angezeigt.

Luftdruck

Ermöglicht die Eingabe eines abweichenden Luftdrucks. Der Standardwert ist immer auf den Wert gesetzt, für den das momentane Diagramm gilt. Bei Änderung des Luftdrucks werden die dazugehörigen Zustandsgrößen der feuchten Luft ermittelt, aber beim Verlassen des Menüs mit „weiter“ erfolgt die Meldung, dass dieser Punkt nicht in das Diagramm eingezeichnet werden kann.

Menge

Diese Eingabe wird benötigt, wenn außer den spezifischen Größen noch Absolutangaben gewünscht sind und bei allen Bilanzrechnungen für Luftzustandsänderungen.

Wert 1 und Wert 2

Hier erfolgt die Auswahl der beiden Zustandsgrößen, die den zu berechnenden Zustandspunkt festlegen.

berechnen

Startet den Berechnungsvorgang.

weiter

Schließt das Fenster, speichert den aktuell definierten Punkt ab, und zeichnet ihn im Diagramm ein, falls der Luftdruck mit dem Diagrammdruck übereinstimmt. Diese Schaltfläche wird erst nach „berechnen“ aktiv.

abbrechen

Schließt das Fenster ohne den Punkt zu speichern.

2.5.5 Punkte-Verwaltung

Punkteverwaltung

1 T:28,95 x:7,49
2 T:25,44 x:15,20
3 T:17,17 x:7,91
Zustand 1 T:30,00 x:10,00
Zustand 2 T:10,00 x:10,00
Mischzustand T:10,36 x:10,00

Bezeichnung: -

Luftdruck [bar]: 1,000

Gebiet: Nicht bekannt

Eingabegrößen:

Temperatur [°C]: 0,00

Feuchtegehalt x [g/kg]: 0,00

Temperatur [°C]: 0,00

Feuchtegehalt x [g/kg]: 0,00

Relative Feuchte [%]: 0,00

Enthalpie [kJ/kg]: 0,00

Spez.-Volumen [m³/kg]: 0,0000

Taupunkt [°C]: 0,00

Kühlgrenz-Temp. [°C]: 0,00

Dampfdruck [Pa]: 0,0

Sätt.-Feuchte xs [g/kg]: -

x-xs [g/kg]: -

Sätt.-Druck [Pa]: 0,0

Luftdichte [kg/m³]: 0,0000

Verbunden ☐

hinzufügen ändern löschen zurück

Die Punkteliste auf der linken Seite listet alle in der aktuellen Sitzung erzeugten Punkte auf. Die Bezeichnung ist wie folgend aufgebaut:

1. Name
2. T: die Temperatur des Punktes
3. x: der Feuchtegehalt des Punktes.

+ und -

Verschiebt einen durch anklicken ausgewählten Punkt in der Liste nach oben oder unten.

Häkchen "Verbunden"

Standardmäßig wird im Diagramm jeder Punkt mit dem vorhergehenden durch eine Linie verbunden. Dies kann hiermit für den momentan gewählten Punkt ausgeschaltet werden.

hinzufügen

Ruft das schon bekannte "Zustand berechnen"-Fenster auf, wo ein weiterer Punkt erzeugt werden kann.

ändern

Ermöglicht es, den momentan gewählten Punkt zu ändern.

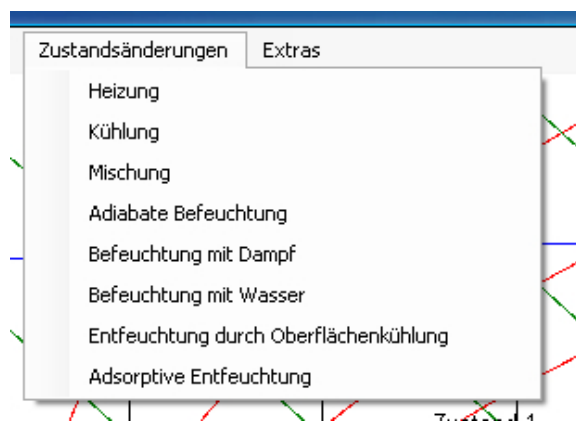
löschen

Enfernt den momentan gewählten Punkt aus der Liste und auch aus dem Diagramm.

zurück

Bewirkt Rückkehr zum Hauptfenster und zeichnet automatisch das Diagramm dort neu, um alle Änderungen darzustellen.

2.6 Zustandsänderungen



Bei allen Zustandsänderungen gilt, dass sie im Diagramm als Linien und Punkte eingetragen werden, falls das Berechnungs-Fenster mit "ok" verlassen wird. Falls dies nicht gewünscht ist, muss nach der Berechnung "abbrechen" gewählt werden. Bei allen Menüpunkten, wo Luftzustände festzulegen sind, kann man als Ausgangspunkt bereits existierende Punkte auswählen oder neue eingeben. Für manche Berechnungen ist allerdings eine Masse oder ein Massestrom erforderlich, da z.B. eine Mischung sonst unsinnig wird. Daher kann es passieren,

dass man zwar im Diagramm Punkte eingezeichnet hat, aber diese nicht auswählen kann, da ihnen keine Mengenangabe zugeordnet ist. Unter "Bezeichnung" kann man in allen Zustandsänderungen den Namen des End-Punktes definieren. Den Namen des Anfangspunktes kann man entweder in der "Zustand berechnen"-Maske eingeben, oder er wird vom ausgewählten Punkt übernommen (s. 2.6.1).

2.6.1 Zustand auswählen



Diese Untermenü erscheint immer dann, wenn auf die Möglichkeit zurückgegriffen wird, einen schon vorher in der aktuellen Sitzung definierten Punkt zum Bestandteil der Zustandsänderung zu machen. Unter "Bezeichnung" lässt sich noch der Name ändern. Dies muss allerdings mit "übernehmen" bestätigt werden, und diese Namensänderung findet sich dann auch logischerweise im Diagramm wieder.

2.6.2 Heizung

Zustandsänderung: Heizen

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

2.) Eingabegröße: Delta-Temperatur [K]

3.) Wert eingeben: 10,00

4.) Bezeichnung: Ende Heizung

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Heizung	Ende Heizung
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	ungesättigt
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	40,00
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	
Temperatur [°C]	30,00	40,00
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	10,00
Relative Feuchte [%]	37,30	21,45
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	66,00
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,9134
Taupunkt [°C]	13,88	13,88
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	22,44
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	1.582,3
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	49,53
x-xs [g/kg]	-	-
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	7.375,6
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,1057
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,01
Volumen [m³/h]	0,88	0,91
Heizleistung [kW]		0,0028

In Abhängigkeit der gewählten Variante 1.) erfolgt eine Zustandsberechnung oder Zustandsauswahl.

In Abhängigkeit der Wahl in 2.) erfolgt die Vorgabe der Möglichkeiten unter 3.)

Dabei bestimmt die Beschreibung des Anfangszustandes die Möglichkeiten unter 2.).

Wenn der Anfangszustand mengenbezogen definiert ist, kann z.B. auch eine Heizleistung vorgegeben werden, andernfalls nicht.

2.6.3 Kühlung

Sowohl Eingabe-Maske als auch das Vorgehen entsprechen dem bei Heizung.

2.6.4 Mischung

Zustandsänderung: Mischung

1.) Mischungsart: Zustand 1 & 2

2.) Zustand 1 eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

3.) Zustand 2 eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

Name f. Mischzustand: Mischzustand

ok abbrechen

Bezeichnung	Zustand 1	Zustand 2	Mischzustand
Luftdruck [bar]	1,000	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	ungesättigt	ungesättigt
Eingabegrößen:			
Temperatur [°C]	30,00	10,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	3,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	1,00	
Temperatur [°C]	30,00	10,00	20,07
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	3,00	6,50
Relative Feuchte [%]	37,30	39,12	44,07
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	17,62	36,68
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8168	0,8505
Taupunkt [°C]	13,88	-2,88	7,50
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	4,44	12,96
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	480,0	1.034,2
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	7,73	14,95
x-xs [g/kg]	-	-	-
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	1.226,9	2.346,7
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,2280	1,1834
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00	2,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,00	2,01
Volumen [m³/h]	0,88	0,82	1,70

Es besteht die Wahl zwischen Vorgabe von zwei Mischungskomponenten oder einer Komponente und dem Mischzustand.

2.6.5 Adiabate Befeuchtung

Zustandsänderung: Adiabate Befeuchtung

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen
 Eingabe oder Auswahl

2.) Berechnungsvariante: vereinfacht (h=konst)

3.) Eingabegröße: Feuchtegehalt x [g/kg]

4.) Wert eingeben: 16,00

5.) Bezeichnung: Ende Adiab. Bef.

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Adiab. ...	Ende Adiab. Bef.
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	Nebel
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	16,00
Masse [kg tr./h]	1,00	
Temperatur [°C]	30,00	19,33
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	16,00
Relative Feuchte [%]	37,30	-
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	55,75
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8589
Taupunkt [°C]	13,88	-
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	-
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	2.240,8
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	14,26
x-xs [g/kg]	-	1,74
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	2.240,8
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,1830
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,02
Volumen [m³/h]	0,88	0,86
Wassermenge [kg/h]		0,006
Befeuchtungsgrad		1,397

Hier gibt es zwei verschiedene Berechnungsvarianten. Siehe Erläuterung unter 1.2.4

2.6.6 Befeuchtung mit Dampf

Zustandsänderung: Befeuchtung mit Dampf

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen
 Eingabe oder Auswahl

2.) Wertekombination: Dampfmenge + Enth.

3.) Dampfenenthalpie [kJ/kg]: 2500,00

4.) Dampfmenge [kg/h]: 0,010

5.) Bezeichnung: Ende Dampf.bef.

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Dampf...	Ende Dampf.bef.
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	ungesättigt
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	
Dampfmenge [kg/h]		0,010
Dampfenenthalpie [kJ/kg]		2.500,00
Temperatur [°C]	30,00	29,46
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	20,00
Relative Feuchte [%]	37,30	75,76
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	80,75
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8966
Taupunkt [°C]	13,88	24,75
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	25,91
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	3.115,3
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	26,67
x-xs [g/kg]	-	-
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	4.112,1
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,1376
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,02
Volumen [m³/h]	0,88	0,90
Dampfmenge [kg/h]		0,010
Dampfenenthalpie [kJ/kg]		2.500,00

In dieser Maske gibt es auch wieder zwei Berechnungsvarianten: Entweder es werden neben dem Anfangszustand die Dampfmenge und die Enthalpie eingegeben. Dann wird der Endzustand berechnet. Oder dieser wird eingegeben, woraufhin dann Dampfmenge und Enthalpie berechnet werden.

2.6.7 Befeuchtung mit Wasser

Zustandsänderung: Befeuchtung mit Wasser

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

2.) Wertekombination: Wassermenge + Temp.

3.) Wassertemperatur [°C]: 10,00

4.) Wassermenge [kg/h]: 0,010

5.) Bezeichnung: Ende Wasser-Bef.

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Wasser...	Ende Wasser-B...
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	Nebel
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	
Wassermenge [kg/h]		0,010
Wassertemp. [°C]		10,00
Temperatur [°C]	30,00	19,35
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	20,00
Relative Feuchte [%]	37,30	-
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	56,17
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8590
Taupunkt [°C]	13,88	-
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	-
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	2.244,9
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	14,28
x-xs [g/kg]	-	5,72
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	2.244,9
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,1875
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,02
Volumen [m³/h]	0,88	0,86
Wassermenge [kg/h]		0,010
Wassertemp. [°C]		10,00

Zwei Berechnungsvarianten: einmal mit Wassermenge und -temperatur und der Ermittlung des Endzustandes; einmal mit Vorgabe des Endzustandes und Bestimmung von Wassermenge und -temperatur.

2.6.8 Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung

Zustandsänderung: Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

2.) Wertekombination: Oberfl.-Temp. & Bypass

3.) Oberflächentemperatur [°C]: 6,00

4.) Bypassfaktor: 0,010

5.) Bezeichnung: Ende Oberf.Kühl.

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Oberf.K...	Ende Oberf.Kühl.
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	ungesättigt
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	
Masse [kg tr./h]	1,00	
Oberflächentemp. [°C]		6,00
Bypassfaktor		0,010
Temperatur [°C]	30,00	6,24
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	5,91
Relative Feuchte [%]	37,30	99,03
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	21,12
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,8097
Taupunkt [°C]	13,88	6,12
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	6,17
Dampfdruck [Pa]	1.582,3	941,0
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,55	5,97
x-xs [g/kg]	-	-
Sätt.-Druck [Pa]	4.242,1	950,3
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,2424
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,01
Volumen [m³/h]	0,88	0,81
Wassermenge [kg/h]		0,004
Oberflächentemp. [°C]		6,00
Bypassfaktor		0,010

Hier ist zwischen drei Wertekombinationen auszuwählen – siehe auch 1.2.7

2.6.9 Adsorptive Entfeuchtung

Zustandsänderung: Adsorptive Entfeuchtung

1.) Anfangszustand eingeben/auswählen

Eingabe oder Auswahl

2.) Eingabegröße: Delta-Feuchte x [g/kg]

3.) Wert eingeben: 3,00

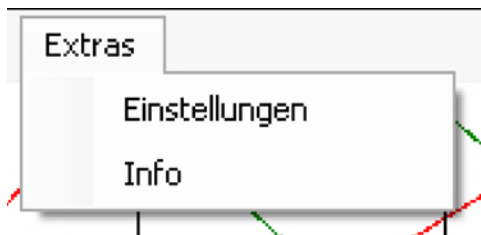
4.) Bezeichnung: Ende Adsorption

berechnen ok abbrechen

Bezeichnung	Anfang Adsorpt...	Ende Adsorption
Luftdruck [bar]	1,000	1,000
Gebiet	ungesättigt	ungesättigt
Eingabegrößen:		
Temperatur [°C]	30,00	
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	7,00
Masse [kg tr./h]	1,00	
Temperatur [°C]	30,00	37,54
Feuchtegehalt x [g/kg]	10,00	7,00
Relative Feuchte [%]	37,30	17,22
Enthalpie [kJ/kg]	55,75	55,75
Spez.-Volumen [m³/kg]	0,8842	0,9019
Taupunkt [°C]	13,88	8,58
Kühlgrenz-Temp. [°C]	19,47	19,55
Dampfdruck [Pa]	1,582,3	1,112,9
Sätt.-Feuchte xs [g/kg]	27,95	42,96
x-xs [g/kg]		
Sätt.-Druck [Pa]	4,242,1	6,461,1
Luftdichte [kg/m³]	1,1422	1,1165
Masse Lt.tr. [kg/h]	1,00	1,00
Masse Lt.ft. [kg/h]	1,01	1,01
Volumen [m³/h]	0,88	0,90
Wassermenge [kg/h]		0,003

Die Eingabelogik entspricht der bei der Befeuchtung.

2.7 Extras



2.7.1 Einstellungen

Einstellungen:

Bildgröße

Auflösung einstellen: ☒ Automatisch ☐ Manuell

Breite: 1024

Höhe: 768

ok abbrechen

Hier kann die Darstellungsgröße des Diagramms eingestellt werden. Standardwert ist "Automatisch", womit das Diagramm automatisch an die Fenstergröße angepasst wird. Falls eine hochaufgelöste Variante gewünscht wird, z.B. für DIN A3-Ausdrucke, kann hier die Bildgröße auf bis zu 4096x4096 Pixel eingestellt werden. Allerdings steigt die Zeit für das Berechnen mit dem Quadrat der Bildgröße.

3 Informationen zum Programm

3.1 Rechentechnische Informationen

Es handelt sich bei LKR:HX um ein in C# geschriebenes Programm, welches zur Berechnung der einzelnen Zustandswerte auf eine in FORTRAN geschriebene DLL zugreift. LKR:HX selber basiert auf dem Microsoft .NET 2.0 Framework, die DLL auf standardkonformen FORTRAN90.

Der Fortran-Teil des Programms besteht aus 3 Dateien:

- ModLKR.F90. Diese Datei ist der Startpunkt aller Berechnungen.
- ModLKRCalc.F90 Hier befinden sich alle Berechnungs-Funktionen.
- ModLKRVars.F90 Datei mit allen Konstanten und auch den Berechnungen für c_{pL} und Dampfdruck.

3.2 Wärmetechnische Informationen

Die Formeln, um den Sättigungsdruck aus der Temperatur und die Temperatur aus dem Sättigungsdruck zu berechnen, sind keine mathematischen Inversen sondern nur Näherungsformeln, die besonders an den Übergangspunkten Abweichungen von bis zu 0.5% aufweisen. Dies führt z.B. im Diagramm dazu, dass, falls man weit genug hineinzoomt, sieht, dass der "Knick" der Temperatur-Linie nicht auf der $\varphi = 1$ Linie liegt, sondern knapp daneben.

Folgendes ist wichtig zu wissen, um das Programm zu verstehen:

- Es gibt bestimmte Wertekombinationen in der Eingabe, die nur über ein Näherungsverfahren ermittelt werden können. Dies sind:
 - Relative Feuchte und Enthalpie
 - Relative Feuchte und spezifisches Volumen
 - Relative Feuchte und Taupunkt
 - Relative Feuchte und Kühlgrenztemperatur
 - Enthalpie und spezifisches Volumen
 - Feuchtegehalt und spezifisches Volumen
 - Spezifisches Volumen und Taupunkt
- Einige Wertekombinationen sind überhaupt nicht ermittelbar, da beide Werte im Diagramm dieselbe Achse beschreiben. Dies sind:
 - Kühlgrenztemperatur und Enthalpie
 - Taupunkt und Dampfdruck
 - Feuchtegehalt und Taupunkt
 - Taupunkt und Dampfdruck
 - Kühlgrenztemperatur und spezifisches Volumen
- Die Datenstruktur, welche die Basis für alles weitere bildet, wird in ModLKRVars.F90 definiert und ist der Kennwert.
- Die nicht-numerische Berechnung läuft über eine Schleife, die in jedem Durchlauf prüft, welche Werte noch unbekannt sind, und versucht diese aus allen anderen vorliegenden Werten zu berechnen. Hierfür sind für jede Berechnung in ModLKRCalc.F90 Abfragen vorgeschaltet, die testen, ob die Voraussetzungen für die jeweilige Formel erfüllt sind.

- Die Näherung für die nur numerisch ermittelbaren Kombinationen erfolgt in einem Intervall-Halbierungsverfahren in der Funktion "FindTemperature", wobei in jedem Schritt eine komplette Berechnung aller Werte durchgeführt wird. Bei Verwendung der Routinen ist daher anzuraten, das Programm möglichst mit Wertkombinationen zu füttern, die direkt ausrechenbar sind.
- Ungültige Kühlgrenztemperaturen und Taupunkte werden als -300 °C zurückgegeben, z.B. im trocknen Bereich, wo sie nicht relevant sind.