

FORMELSAMMLUNG



THERMODYNAMIK TEIL 1

by Marcel Laube

FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK

<i>Grundbegriffe der technischen Strömungslehre</i>	5
Masse	5
Volumen	5
molares Volumen	5
Dichte	5
Temperatur-Umrechnungen	5
Druck	5
Der Absolute Druck	6
Luftdruck in der Höhe h	6
Z-Werte für trockene Luft	6
Zustandsgleichung	6
Allgemeine Gaskonstante	7
Spezielle Gaskonstante	7
Tabelle: Gaskonstante, Dichte und spez. Wärmekapazität von Gasen	7
Tabelle: Wahre spezifische Wärmekapazität c_p von Gasen in $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	7
Dichte eines Gases bei Normzustand	8
Dichte von Gasen	8
Spezifische Wärmekapazität	8
Mittlere spez. Wärmekapazität	8
Mischen von Stoffen bei gleichbleibendem Aggregatzustand	8
Schmelz- oder Erstarrungswärme (latent)	9
Verdampfungs- oder Verflüssigungswärme (latent)	9
Längenausdehnung bei Temperaturänderung	9
Längenausdehnungskoeffizient	9
Länge bei erhöhter Temperatur	9
Volumenausdehnung bei Temperaturänderung	9
Wärmespannung	9
Ausdehnung von Flüssigkeiten	10
Temperaturabhängige Änderung von Gasen	10
<i>Thermodynamische Prozesse</i>	10
Volumenänderungsarbeit pro kg	11
Technische Arbeit pro kg	11
spezifische Enthalpie	12
Zusammenhang zwischen c_p und c_v	12
Enthalpiedifferenz beim Wärmetauscher	12
<i>Gasmischung</i>	12

Masse einer Gasmischung	12
Volumen einer Gasmischung	12
Volumenprozent	12
Das Gesetz von Dalton	13
Partialdruck	13
Dichte einer Gasmischung	13
spezielle Gaskonstante eines Gasgemisches	13
spezifische Wärmekapazität eines Gemisches	13
Zusammenhang zwischen Massen und Raumanteil	13
Gas-Dampf-Gemisch	14
Barometerdruck	14
Relative Feuchte	14
Absolute Feuchte	14
Masse der trockenen Luft	14
Zusammenhang von absoluter und relativer Feuchte	14
Dichte feuchter Luft	15
Enthalpie feuchter Luft	15
Enthalpie des Wasserdampfes	15
H-x-Diagramm	15
Der Taupunkt	17
Die Feuchtkugeltemperatur	17
Die Mischung von Luft	17
Die Lufterwärmung	18
Temperaturerhöhung im Ventilator	18
Die Dampfbefeuchtung	19
Spezifische Enthalpie des Wasserdampfes	19
Befeuchterleistung	19
notwendige Dampfmenge	19
Die Befeuchtung durch Wasserverdunstung	19
Befeuchterleistung	20
verdunstete Wassermenge	20
Befeuchter-Wirkungsgang	20
Kühlung der Luft	20
Ohne Wasserausscheidung	20
Mit Wasserausscheidung	20
Kühleroberflächentemperatur	21
Mittlere Kühlwassertemperatur	21
Bypassfaktor	21
Kühlerleistung	21
Auskondensierte Wassermenge	21
Zustandsänderung der Gase	22
Begriffe	22
Isobare	22

FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK

Isochore	22
Isotherme	22
Isentrope	22
Polytropen	22
Entropie-Änderung	22
Isobare	23
Zu- abgeführte Energie	23
Entropieänderung	23
Isochore	23
Zu- abgeführte Energie	23
Entropieänderung	23
Isotherme	24
Wärmeenergie	24
Zu- abgeführte Energie	24
Isentropen	24
Isentropenexponent	24
Zustandsgleichung	24
Volumenänderungsarbeit	25
Technische Arbeit	25
Polytropen	26
Wärmeenergie	26
Volumenänderungsarbeit	26
Entropie	26

Grundbegriffe der technischen Strömungslehre

Masse

$$m = M * n \quad [\text{kg}]$$

M = molare Masse
n = Stoffmenge

Volumen

$$V = v * m \quad [\text{m}^3]$$

v = spezifisches Volumen [m^3/kg]
m = Masse [kg]

molares Volumen

$$v = \frac{V}{n} \quad [\text{m}^3/\text{kmol}]$$

V = Volumen [m^3]
n = Stoffmenge [kmol]

Dichte

$$\rho = \frac{1}{v} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

v = spezifisches Volumen [m^3/kg]

$$\rho = \frac{p}{R * T} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Temperatur-Umrechnungen

$$T = t + 273 \quad [^\circ\text{C}]$$

T = Temperatur in [K]
t = Temperatur in [$^\circ\text{C}$]

$$t = \frac{5}{9}(t_F - 32) \quad [^\circ\text{C}]$$

t_F = Tenperatur in [$^\circ\text{F}$]

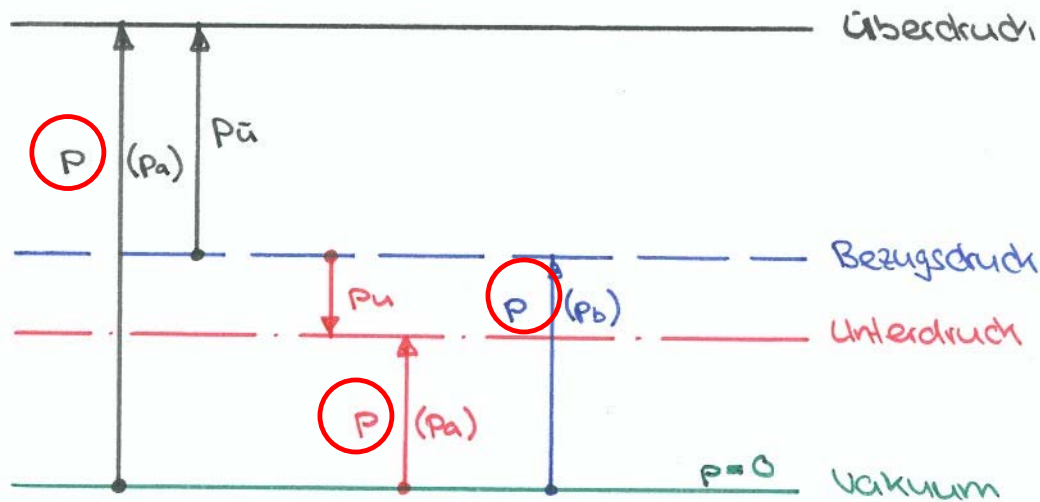
$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t \quad [^\circ\text{F}]$$

Druck

$$p = \frac{F_N}{A} \quad [\text{N}/\text{m}^2] = [\text{Pa}]$$

F_N = Normalkraft [N]
A = Fläche [m^2]

Der Absolute Druck



Luftdruck in der Höhe h

$$p = p_0 * e^{\frac{-\rho_0 * g * h}{p_0}} \quad [\text{bar}]$$

p_0 = Normdruck 1,013 [bar]
 ρ_0 = Normdichte 1,293 [kg/m³]

Z-Werte für trockene Luft

$$z = \frac{p * V}{R * T}$$

Druck	Temperatur		
	0°C	100°C	200°C
Bar			
0	1,0000	1,0000	1,0000
19,62	0,9895	1,0027	1,0064
49,05	0,9779	1,0087	1,0168
98,10	0,9699	1,0235	1,0364

Zustandsgleichung

$$\frac{p * V}{T} = \text{konst.}$$

$$p * v = R * T$$

p = Druck [Pa]
 v = spez. Volumen [m³/kg]
 R = spez. Gaskonstante [J/kg*K]
 T = Temperatur [K]

Oder

$$p * V = m * R * T$$

V = Volumen [m³]
 m = Masse [kg]

FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK

Allgemeine Gaskonstante

$$R_A = 8314 \text{ [J/kmol}\cdot\text{K]}$$

Spezielle Gaskonstante

$$R = \frac{R_A}{M} = \frac{8314}{M}$$

M = Molarmasse [kg/kmol]

Tabelle: Gaskonstante, Dichte und spez. Wärmekapazität von Gasen

Gas	Symbol	Molekulare Masse M	Molares Normvolumen m ³ /kmol	Gaskonstante R J/kg*K	Dichte bei 0°C, 1013bar ρ kg/m ³	Dichteverhältnis Luft=1	Spez. Wärmekap. bei 0°C		K= c _p /c _v
							c _p kJ/kg*K	c _v kJ/kg*K	
Azetylen	C ₂ H ₂	26,04	22,23	319,5	1,171	0,906	1,51	1,22	1,26
Ammoniak	NH ₃	17,03	22,06	488,2	0,772	0,597	2,05	1,56	1,31
Argon	Ar	39,95	22,39	208,2	1,784	1,380	0,52	0,32	1,65
Chlorwasserstoff	HCl	36,46	22,20	228,0	1,642	1,270	0,81	0,58	1,40
Ethan	C ₂ H ₆	30,07	22,19	276,5	1,356	1,049	1,73	1,44	1,20
Enthylchlorid	C ₂ H ₅ Cl	64,50	---	128,9	2,880	2,228	---	---	1,16
Ethylen	C ₂ H ₄	28,03	22,25	296,6	1,261	0,975	1,61	1,29	1,25
Helium	He	4,003	22,43	2077,0	0,178	0,138	5,24	3,16	1,66
Kohlendioxyd	CO ₂	44,01	22,26	188,9	1,977	1,529	0,82	0,63	1,30
Kohlenoxyd	CO	28,01	22,40	296,8	1,250	0,967	1,04	0,74	1,40
Luft (CO ₂ -frei)	---	28,96	22,40	287,1	1,293	1,000	1,00	0,72	1,40
Methan	CH ₄	16,04	22,36	518,3	0,717	0,555	2,16	1,63	1,32
Methylchlorid	CH ₃ Cl	50,48	---	164,7	2,307	1,784	0,73	0,57	1,29
Sauerstoff	O ₂	32,00	22,39	259,8	1,429	1,105	0,91	0,65	1,40
Schwefeldioxyd	SO ₂	64,06	21,86	129,8	2,931	2,267	0,61	0,48	1,27
Stickoxyd	NO	30,01	22,39	277,1	1,340	1,037	1,00	0,72	1,39
Stickoxydul	N ₂ O	44,01	22,25	188,9	1,978	1,530	0,89	0,70	1,27
Stickstoff	N ₂	28,01	22,40	296,8	1,250	0,967	1,04	0,74	1,40
Wasserstoff	H ₂	2,016	22,43	4124,0	0,0899	0,0695	14,38	10,26	1,41
Wasserdampf	H ₂ O	18,02	(21,1)	461,5	(0,804)	(0,621)	1,93	1,45	1,33

Tabelle: Wahre spezifische Wärmekapazität c_p von Gasen in kJ/kg*K

Bei konstantem Druck

Temperatur °C	O ₂	H ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	Luft
0	0,915	14,10	1,039	1,859	0,815	1,004
50	0,925	14,32	1,041	1,875	0,864	1,007
100	0,934	14,45	1,042	1,890	0,914	1,010
200	0,963	14,50	1,052	1,941	0,993	1,024
500	1,048	14,66	1,115	2,132	1,155	1,092
1000	1,123	15,62	1,215	2,482	1,290	1,184
1500	1,164	16,56	1,269	2,755	1,350	1,235
2000	1,200	17,39	1,298	2,938	1,378	1,265

Die spez. Wärmekapazität c_p je m³ erhält man durch Multiplikation mit der Dichte ρ.

Dichte eines Gases bei Normzustand

$$\rho_n = \frac{M}{v} = \frac{M}{22,414} \quad [\text{kg/m}^3]$$

M = Molmasse [kg/kmol]

$$\rho_n = \frac{p_n}{R * T_n} \quad [\text{kg/m}^3]$$

p_n = Normdruck 101300 [Pa]

R = spez. Gaskonstante [J/kg*K]

T_n = Normtemperatur 273 [K]

Dichte von Gasen

$$\rho = \rho_n * \frac{p}{p_n} * \frac{T_n}{T} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Spezifische Wärmekapazität

$$c = \frac{Q'}{m * \Delta t} \quad [\text{J/kg*K}] \quad [\text{kJ/kg*K}]$$

Q' = Wärmemenge [J] [kJ]

m = Masse [kg]

Δt = Temperaturdifferenz [K]

c_p = Spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck

c_v = Spez. Wärmekapazität bei konstantem Volumen

Mittlere spez. Wärmekapazität

$$c_m = \frac{c|_{t_0}^{t_2} (t_2 - t_0) - c|_{t_0}^{t_1} (t_1 - t_0)}{t_2 - t_1} \quad [\text{kJ/kg*K}]$$

Für Wasser: 4,19 [kJ/kg*K]

Für Luft: 1.006 [kJ/kg*K]

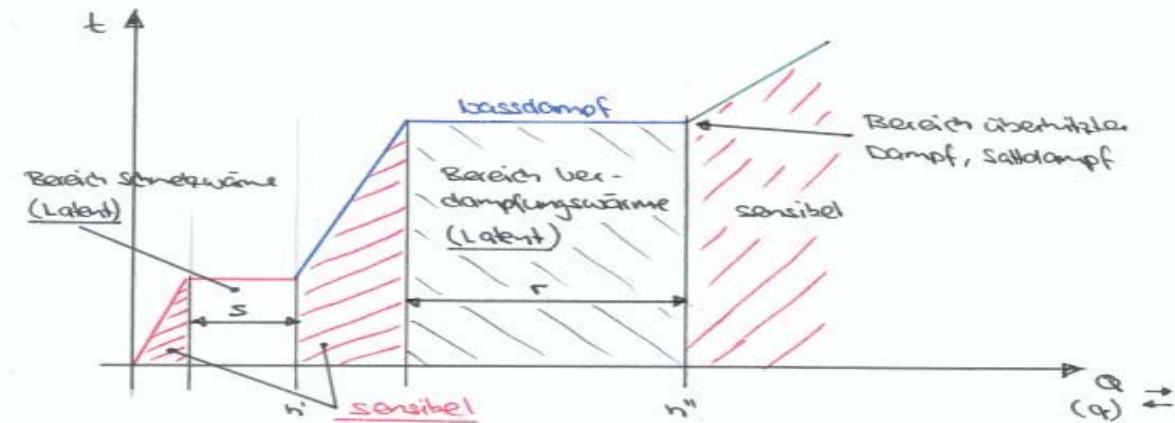
Mischen von Stoffen bei gleichbleibendem Aggregatzustand

$$t_m = \frac{c_1 * m_1 * t_1 + c_2 * m_2 * t_2}{c_1 * m_1 + c_2 * m_2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Beim Mischen zweier gleichen Stoffe (c₁=c₂):

$$t_m = \frac{m_1 * t_1 + m_2 * t_2}{m_1 + m_2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Schmelz- oder Erstarrungswärme (latent)



$$Q = m * s \quad [\text{kJ}]$$

m = Masse [kg]
s = spez. Schmelzwärme [kJ/kg]

Verdampfungs- oder Verflüssigungswärme (latent)

$$Q = m * r \quad [\text{kJ}]$$

m = Masse [kg]
r = spez. Verdampfungsw. [kJ/kg]

Längenausdehnung bei Temperaturänderung

Längenausdehnungskoeffizient

$$\alpha_1 = \frac{l_2 - l_1}{l_1(t_2 - t_1)} \quad [\text{K}^{-1}]$$

l = Länge [m]
t = Temperatur [K]

Länge bei erhöhter Temperatur

$$l_2 = l_1(1 + \alpha_0 * \Delta t) \quad [\text{m}]$$

l₁ = Anfangslänge [m]
α₀ = Längenausdehnungskoeff. [K⁻¹]
Δt = Temperaturdifferenz [K]

Volumenausdehnung bei Temperaturänderung

$$V_2 = V_1(1 + \gamma_0 * \Delta t) \quad [\text{m}^3]$$

V₁ = Anfangsvolumen [m³]
γ₀ = Raumausdehnungskoeff. [K⁻¹]
Δt = Temperaturdifferenz [K]

Wärmespannung

$$\partial = \alpha_0 * E * \Delta t \quad [\text{N/mm}^2]$$

α₀ = Längenausdehnungskoeff. [K⁻¹]
E = Elastizitätsmodul [N/mm²]
Δt = Temperaturdifferenz [K]

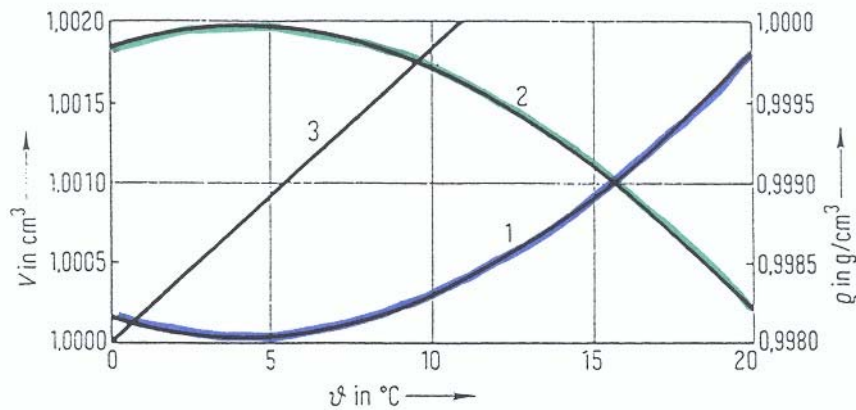
Ausdehnung von Flüssigkeiten

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma_0 \cdot \Delta t} \quad [\text{kg/m}^3]$$

ρ_0 = Dichte bei 0°C [kg/m³]

γ_0 = Volumenausd.Koeff. [K⁻¹]

Δt = Temp.Differenz [K]



Kurve 1 Volumen von 1 g Wasser bei 1,01 bar.

Kurve 2 Dichte von Wasser bei 1,01 bar.

Kurve 3 Volumen von Quecksilber, bezogen auf 1 cm³ bei 0°C

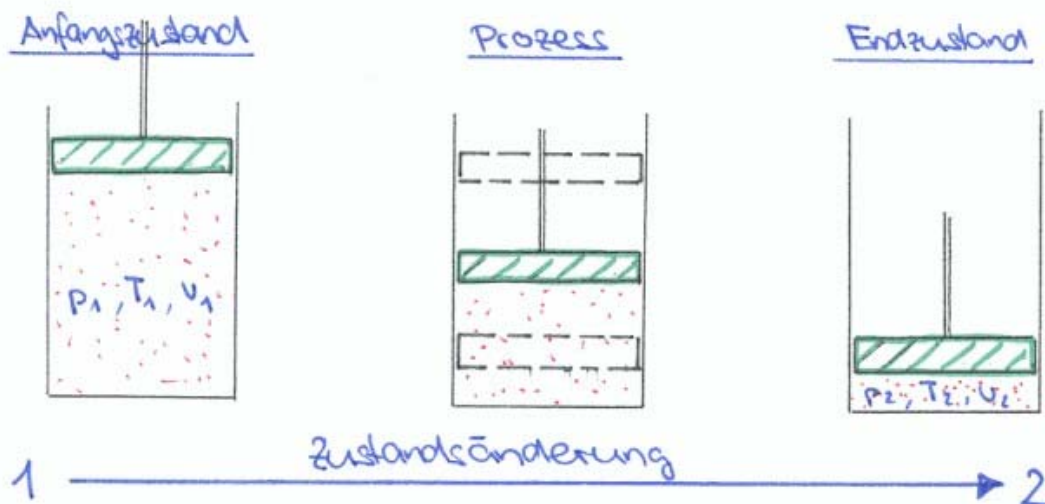
Temperaturabhängige Änderung von Gasen

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

V = Volumen

T = Temperatur

Thermodynamische Prozesse



Volumenänderungsarbeit pro kg

→ ist die Arbeit, die zugeführt wird, um ein Volumen zu ändern (bei geschlossenen Systemen).

$$w = \frac{W}{m} \quad [\text{kJ/kg}]$$

wobei gilt:

dem System zugeführte Arbeit:

$W =$ Volumenänderungsarbeit [kJ]

aus dem System abgeführte Arbeit:

$w < 0$ (-)

$w > 0$ (+)

$$W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = p \cdot V \quad [\text{kJ}]$$

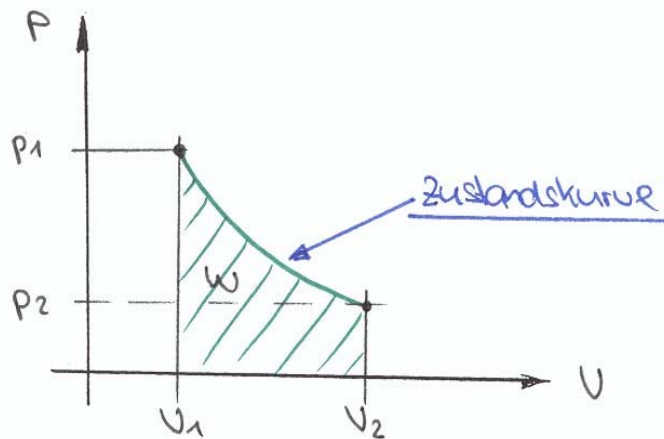
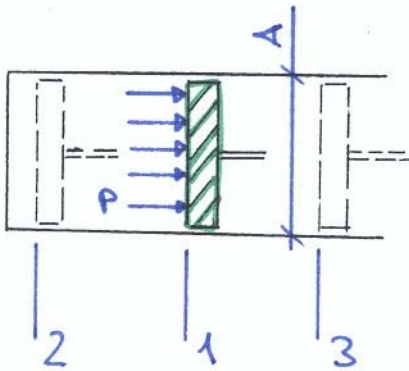
$F =$ Kraft [N]

$\Delta s =$ Kolbenweg [m]

$A =$ Kolbenfläche [m²]

$P =$ Druck [Pa]

$V =$ Volumen [m³]

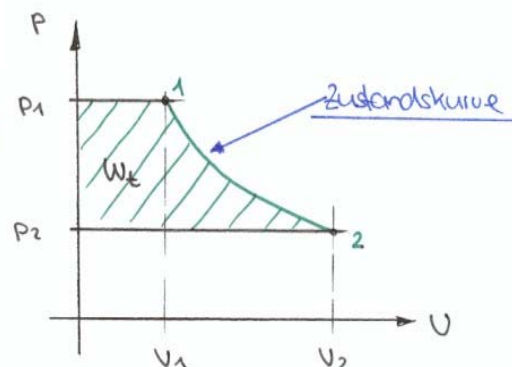
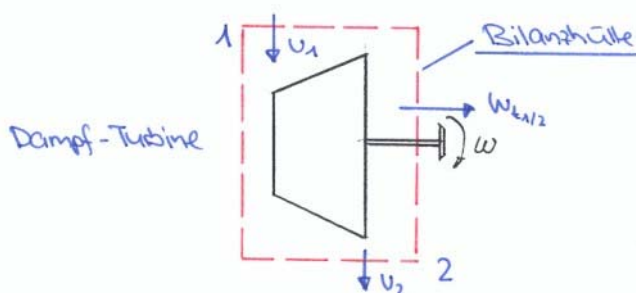


Technische Arbeit pro kg

→ ist die Arbeit, die in eine offenen System zugeführt wird. Sie ist die dauernd zu- oder abgeführte Wellenleistung.

$$w_t = \frac{W_t}{m} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$W_t =$ technische Arbeit [kJ]



FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK

spezifische Enthalpie

$$h = u + p \cdot v$$

u = innere Energie
p = Druck [Pa]
v = spez. Volumen

$$\Delta h = h_2 - h_1 = q_{1,2} + w_{t1,2}$$

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$$

Zusammenhang zwischen c_p und c_v

$$R = c_p - c_v$$

R = spezielle Gaskonstante

Enthalpiedifferenz beim Wärmetauscher

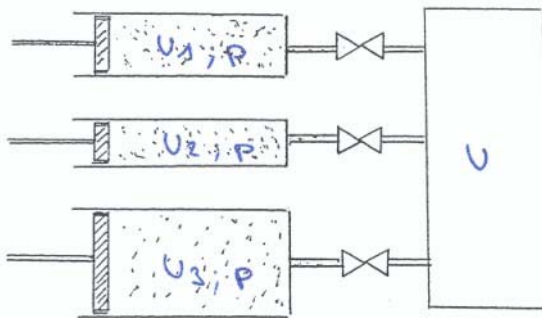
$$\Delta h = c_p \cdot \Delta t$$

Gasmischung

Masse einer Gasmischung

$$m = m_1 + m_2 + m_3 \dots$$

Volumen einer Gasmischung



$$\frac{V_1}{V} = \frac{V_2}{V} = \frac{V_3}{V} \dots$$

V_1 = Volumen des Einzelgases
 V = Volumen nach der Mischung

Volumenprozent

$$r_i = \frac{V_i}{V} [-]$$

V_i = Volumen d. Einzelgases vorher
 V = Gesamtvolumen nachher

Das Gesetz von Dalton

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Partialdrücke.

$$p = p_1 + p_2 + p_3$$

Partialdruck

$$p_i = r_i \cdot p$$

r_i = Volumenprozent [-]
 p = Gesamtdruck des Gemisches

Die Partialdrücke verhalten sich in einem idealen Gasgemisch wie die Raumanteile

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{p_1}{p_2}$$

Dichte einer Gasmischung

$$\rho_m = r_1 \cdot \rho_1 + r_2 \cdot \rho_2 \dots \quad [\text{kg/m}^3]$$

r = Volumenprozent [-]
 ρ = Dichte des Einzelgases

spezielle Gaskonstante eines Gasgemisches

$$R_m = g_1 \cdot R_1 + g_2 \cdot R_2 \dots$$

wobei:

$$g_1 = \frac{m_1}{m}$$

m_1 = Masse des Gases 1
 m = Gesamtmasse d. Gemisches

spezifische Wärmekapazität eines Gemisches

$$c_m = g_1 \cdot c_1 + g_2 \cdot c_2 \dots$$

gilt für c_p und c_v

Zusammenhang zwischen Massen und Raumanteil

$$g_i = r_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho_m}$$

$$g_i = r_i \cdot \frac{R_m}{R_i}$$

Gas-Dampf-Gemisch

Barometerdruck

$$p_b = p_L + p_D$$

p_L = Druck der trockenen Luft
 p_D = Druck des Wasserdampfes

Relative Feuchte

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} \quad [\%]$$

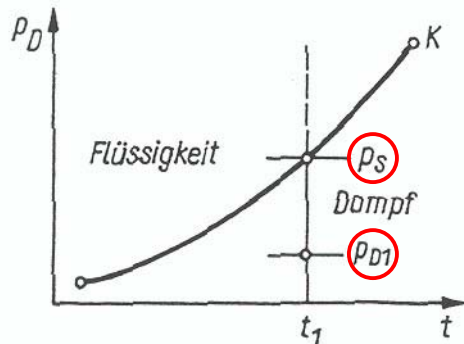
p_D = Dampfdruck

p_s = Sättigungsdruck

$$\varphi = \frac{m_D}{m_s} \quad [\%]$$

m_D = Enthaltene Wasserdampfmenge

m_s = max. mögliche Wasserdampfmenge



Absolute Feuchte

$$x = \frac{m_D}{m_L} \quad [\text{g/kg}]$$

m_D = Masse des Wasserdampfes [g]

m_L = Masse der trockenen Luft [kg]

Masse der trockenen Luft

$$m_L = \frac{m}{x+1} \quad [\text{kg}]$$

m = Masse der Luft (Gemisch) [kg]

x = Absolute Feuchte [kg/kg]

Zusammenhang von absoluter und relativer Feuchte

$$x = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p_b - \varphi \cdot p_s}$$

p_s = Sättigungsdruck

p_b = Barometerdruck

Wenn die Luft gesättigt ist:

$$x_s = 0.622 \cdot \frac{p_s}{p_b - p_s}$$

Dichte feuchter Luft

$$\rho = \frac{m}{V} = \left(\frac{p_b - \varphi^* p_s}{R_L} + \frac{\varphi^* p_s}{R_D} \right) \frac{1}{T} \quad [\text{kg/m}^3]$$

oder

$$\rho = \frac{1+x}{R_L + x \cdot R_D} \cdot \frac{p_b}{T} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Enthalpie feuchter Luft

$$h = h_L + x \cdot h_D \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$$

h_L = spez. Enthalpie der Luft bei Temp. t
 x = absolute Feuchte
 h_D = spez. Enthalpie des Wasserdampfes bei Temp. t

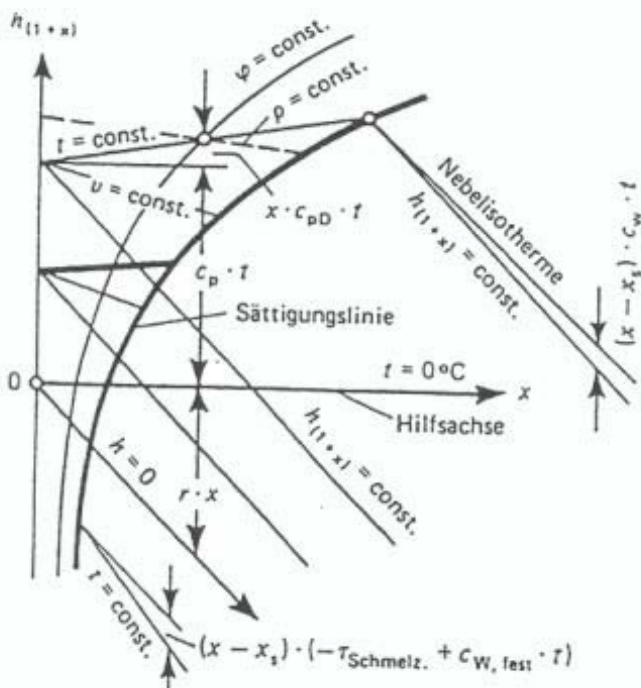
$$h = 1.006 \cdot t + x(2500 + 1.86 \cdot t)$$

Enthalpie des Wasserdampfes

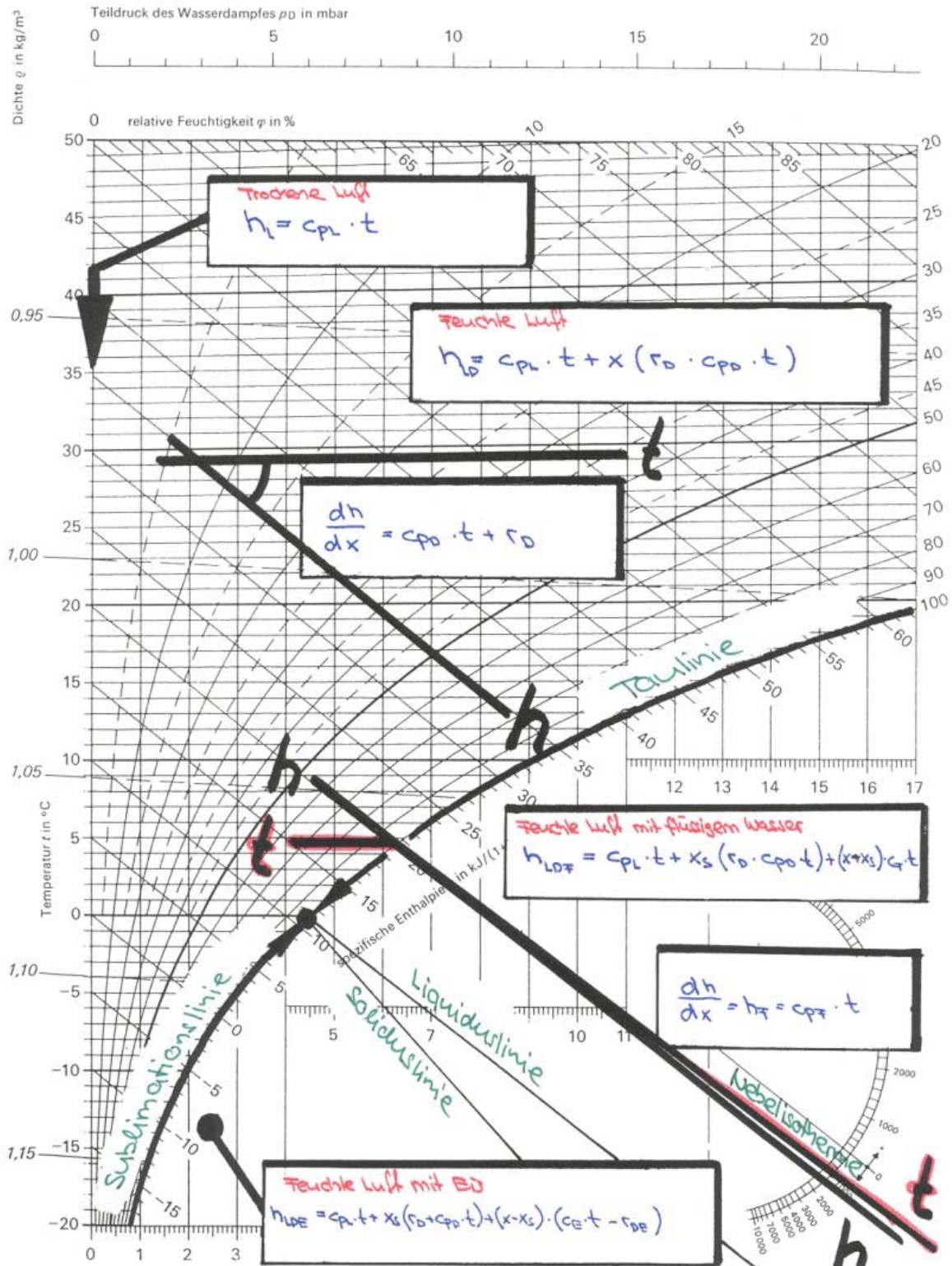
$$h_D = r_D + c_{pD} \cdot t$$

r_D = Verdampfungswärme bei 0°C

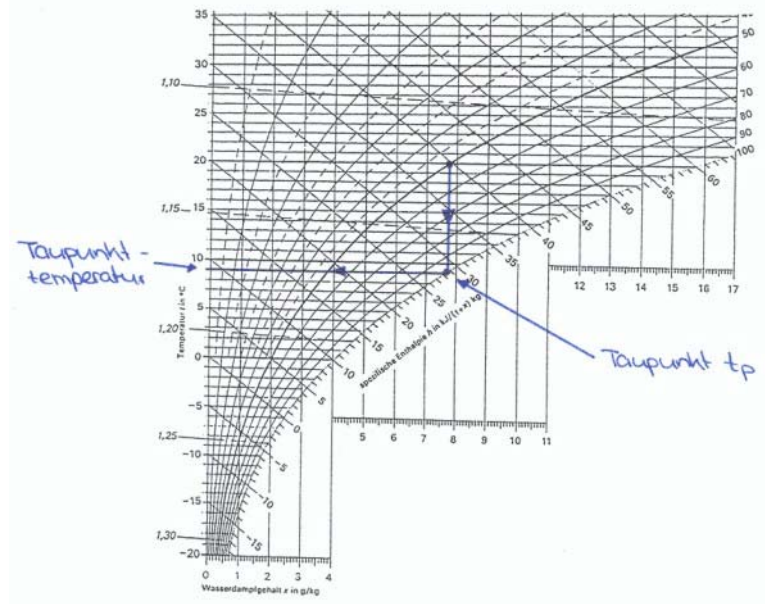
H-x-Diagramm



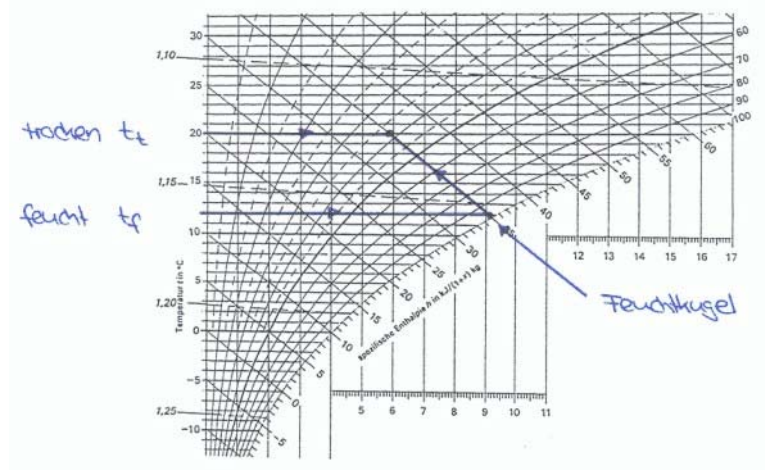
FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK



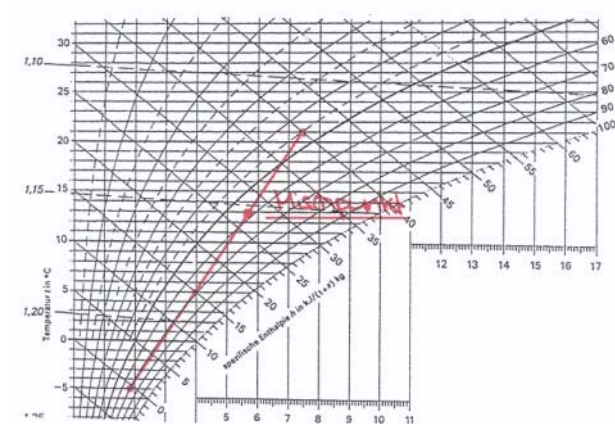
Der Taupunkt



Die Feuchtkugeltemperatur



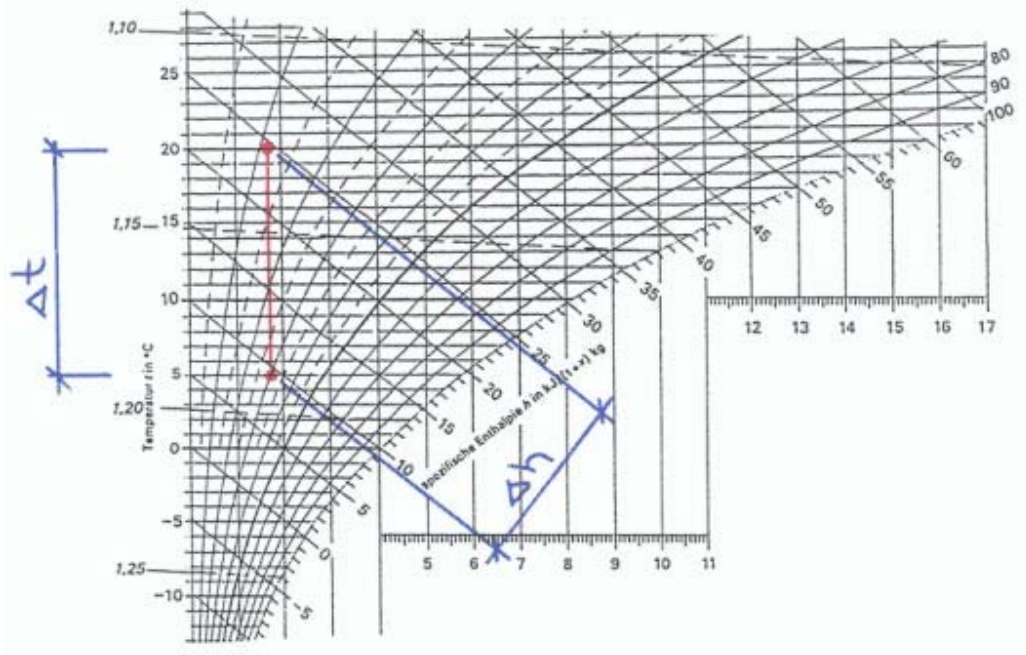
Die Mischung von Luft



$$h_m = \frac{m'_1 \cdot h_1 + m'_2 \cdot h_2}{m_M} = \frac{m'_1 \cdot h_1 + m'_2 \cdot h_2}{m'_1 + m'_2}$$

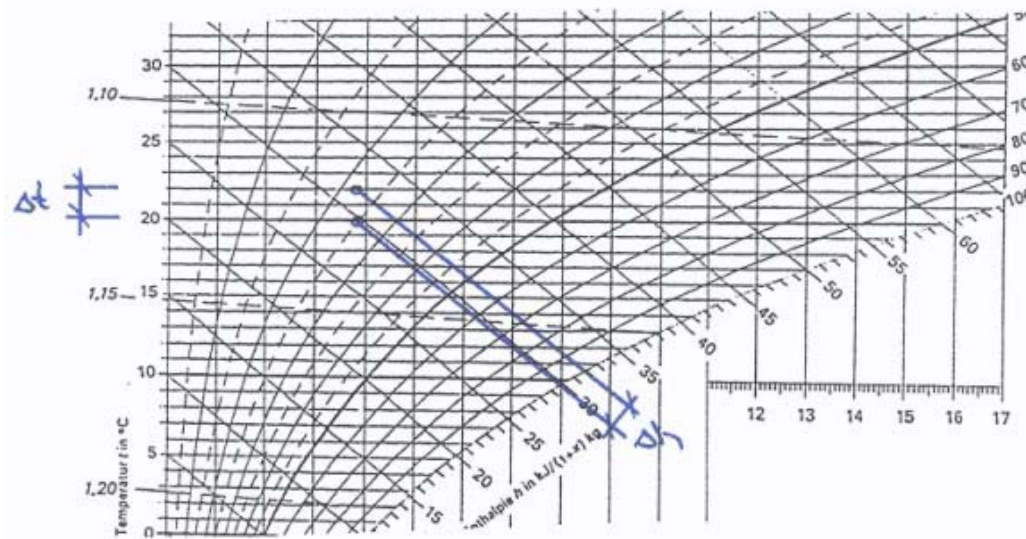
$$x_m = \frac{m'_1 \cdot x_1 + m'_2 \cdot x_2}{m'_M} = \frac{m'_1 \cdot x_1 + m'_2 \cdot x_2}{m'_1 + m'_2}$$

Die Lufterwärmung



$$Q' = m' \cdot c_p \cdot \Delta t = m' \cdot \Delta h$$

Temperaturerhöhung im Ventilator



$$\Delta t = \frac{P}{m' \cdot c_p}$$

P = Motorenleistung [W]

m' = Massenstrom Luft [kg/s]

c_p = spez. Wärmekapazität von Luft

Die Dampfbefeuchtung

Spezifische Enthalpie des Wasserdampfes

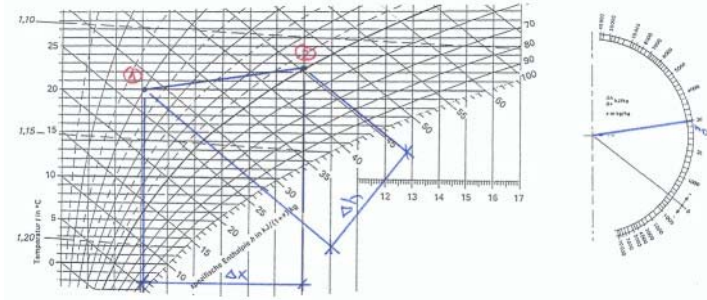
(wird in den Randmassstab eingetragen)

Sattdampf (aus Tabelle): h''

Überhitzter Dampf: $h = h'' + c_D(t_D - t_s)$

t_D = Dampftemperatur

t_s = Sattdampftemperatur



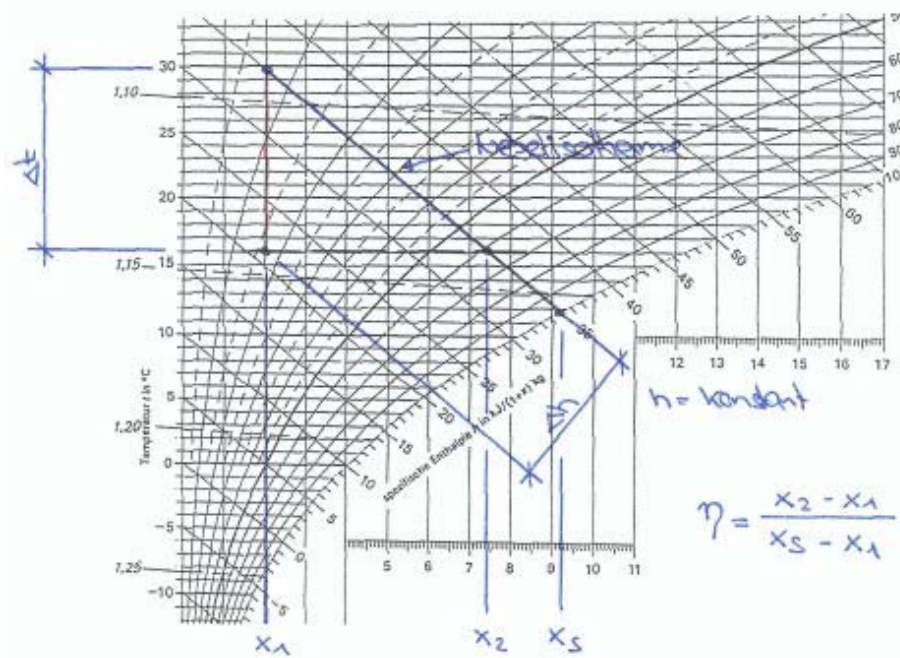
Befeuchterleistung

$$Q'_B = m' \cdot \Delta h \quad [\text{kW}]$$

notwendige Dampfmenge

$$m'_D = \frac{m' \cdot \Delta x}{1000} \quad [\text{kg/h}]$$

Die Befeuchtung durch Wasserverdunstung



Befeuchterleistung

$$Q'_B = m' \cdot \Delta h = m' \cdot c_p \cdot \Delta t \quad [\text{kW}]$$

verdunstete Wassermenge

$$m'_w = \frac{m' \cdot \Delta x}{1000} \quad [\text{kg/h}]$$

Befeuchter-Wirkungsgard

$$\eta_B = \frac{x_2 - x}{x_s - x_1}$$

Kühlung der Luft

Ohne Wasserausscheidung

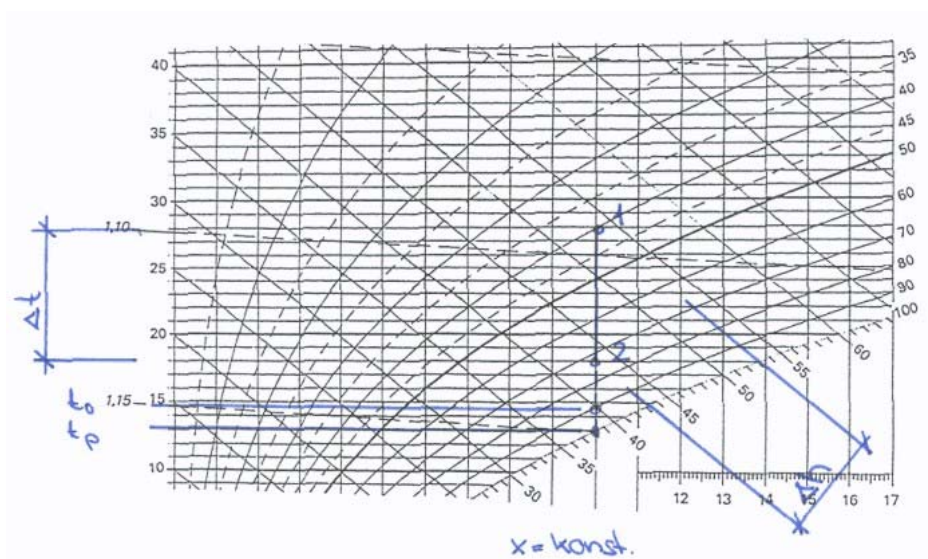
Bedingung für eine Kühlung ohne Wasserausscheidung ist:

- $t_0 > t_p$
- $x_1 = x_2$ ($x = \text{konstant}$)

Mit Wasserausscheidung

Bedingung für eine Kühlung mit Wasserausscheidung ist:

- $t_0 < t_p$
- $x_1 \neq x_2$



Kühleroberflächentemperatur

$$t_O \cong t_K + 0.15(t_1 - t_K) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

t_K = mittl. Kühlwassertemp. [$^{\circ}\text{C}$]
 t_1 = Lufteintrittstemp. In Kühler [$^{\circ}\text{C}$]

oder (für die Praxis)

$$t_O \cong t_m + 3[K] \quad [^{\circ}\text{C}]$$

t_m = mittl. Kühlwassertemp. [$^{\circ}\text{C}$]

Mittlere Kühlwassertemperatur

$$t_K = \frac{t_V + t_R}{2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

t_V = Vorlauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 t_R = Rücklauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Bypassfaktor

$$f_B = \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0} \quad [-]$$

Kühlerleistung

$$Q' = m' \cdot \Delta h \quad [\text{kW}]$$

m' = Luftmassenstrom [kg/h]
 Δh = Enthalpiediff. [kJ/kg]

Auskondensierte Wassermenge

$$m'_K = \frac{m' \cdot \Delta x}{1000} \quad [\text{kg/h}]$$

m' = Massenstrom Luft [kg/h]
 Δx = abs. Feuchte-Differenz [kg/kg]

+

Zustandsänderung der Gase

Begriffe

Isobare

= Zustandsänderung bei **konstantem Druck**
(z. B. Luftherhitzer / Luftkühler / Befeuchter)

Isochore

= Zustandsänderung bei **konstantem Volumen**
(z. B. Gasflasche)

Isotherme

= Zustandsänderung bei **konstanter Temperatur**
(in Praxis nicht vorkommend)

Isentrope

= Zustandsänderung **ohne Wärmeeinwirkung**
(z. B. Adiabate Kühlung)

Polytropen

= Zustandsänderung bei der sich gleichzeitig **alle Grössen verändern** können

Entropie-Änderung

≅ auf die absolute Temperatur bezogene Änderung der Wärmeenergie

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad [\text{kJ/K}]$$

ΔQ = reversible zu- oder abgeführte

T = Wärmeenergie [kJ]
absolute Temperatur [K]

Entropieänderung bezogen auf die Masseneinheit:

$$\Delta s \quad [\text{kJ/kg}\cdot\text{K}]$$

Isobare

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Isobare Expansion => Ausdehnung
Isobare Kontraktion => Zusammenziehen

Zu- abgeführte Energie

$$q_{1,2} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \\ = c_p (t_2 - t_1)$$

Entropieänderung

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$$

oder

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Isochore

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Zu- abgeführte Energie

$$q_{1,2} = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \\ = c_v (t_2 - t_1)$$

Entropieänderung

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

oder

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Isotherme

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Wärmeenergie

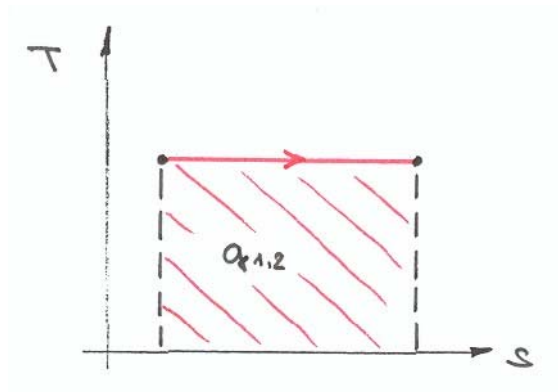
$$w_{1,2} = w_{t1,2} = R * T_1 * \ln \frac{V_2}{V_1}$$

oder

$$w_{1,2} = w_{t1,2} = p_1 * v_1 * \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Zu- abgeführte Energie

$$q_{1,2} = -w_{t1,2} = -w_{1,2}$$



Isentropen

Isentropenexponent

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} [-]$$

c_p = spez. Wärmekap. bei

konstantem Druck [kJ/kg*K]

c_v = spez. Wärmekap. bei
konstantem Volumen [kJ/kg*K]

aber auch

$$\frac{R}{c_p} = \frac{\chi - 1}{\chi}$$

$$\frac{R}{c_v} = \chi - 1$$

Zustandsgleichung

$$p * v^\chi = konst.$$

FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK

und deshalb:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^\chi$$

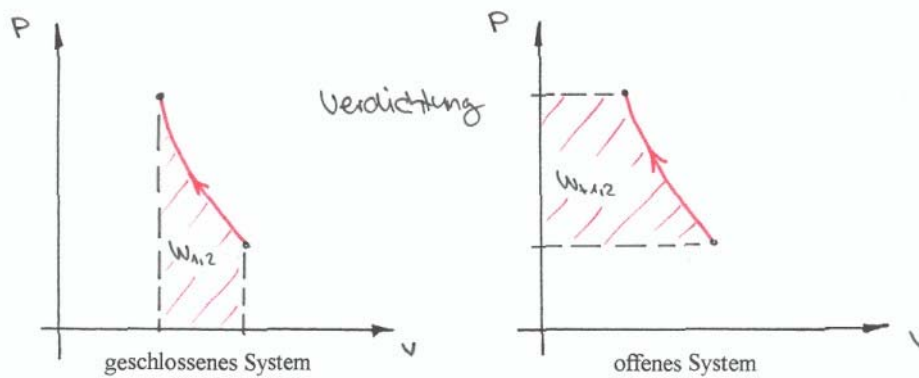
$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\chi}{\chi-1}}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\chi-1}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\chi}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{\chi-1}}$$



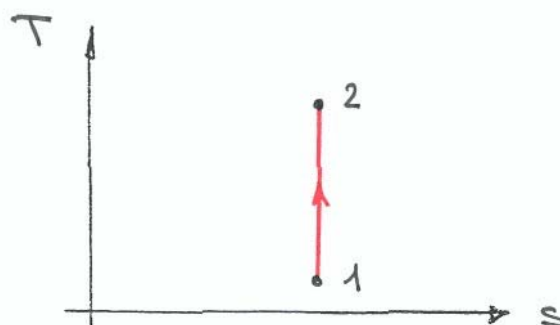
Volumenänderungsarbeit

$$w_{1,2} = \frac{R}{\chi-1} (T_1 - T_2)$$

$$w_{1,2} = \frac{1}{\chi-1} (p_1 * v_1 - p_2 * v_2)$$

Technische Arbeit

$$w_{t1,2} = \chi * w_{1,2}$$



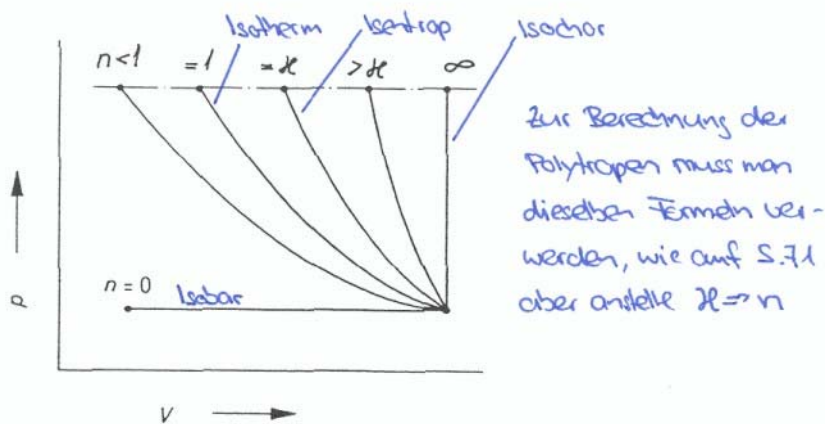
Polytropen

Wenn alle Zustandsänderungen auftreten.

$$p \cdot v^n = \text{konst.}$$

n ist der sogenannte **Polytropenexponent**. Er kann alle Werte zwischen $\pm\infty$ annehmen. Es gilt:

- Isobare $n = 0$
- Isochore $n = \pm\infty$
- Isotherme 1
- Isentrope χ



Wärmeenergie

$$q_{1,2} = c_v (T_2 - T_1) + w_{1,2}$$

$$q_{1,2} = c_v \frac{n - \chi}{n - 1} (T_2 - T_1)$$

Volumenänderungsarbeit

$$w_{1,2} = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2)$$

$$w_{1,2} = c_v \frac{\chi - 1}{n - 1} (T_1 - T_2)$$

Entropie

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \left(\frac{n - \chi}{n - 1} \right) \ln \frac{T_1}{T_2}$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

