



Hochschule  
Zittau/Görlitz  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

# Formelsammlung

## Prozessthermodynamik und Stoffübertragung

**Fakultät Maschinenwesen**  
**Fachgebiet Technische Thermodynamik**

von  
Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar  
Dr.-Ing. S. Herrmann

Ausgabe: Sommersemester 2019

Fachgebiet Technische Thermodynamik  
Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar  
Dr.-Ing. S. Herrmann

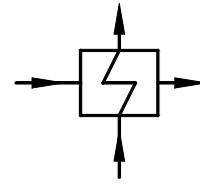
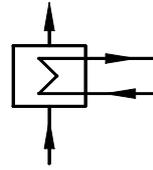
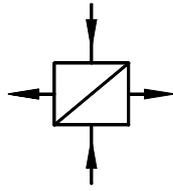
## Formelsammlung

### Prozessthermodynamik und Stoffübertragung

	Seite
Schaltbilder für Bauelemente der Energietechnik (DIN 2481)	IV
Kreisprozesse	18/1
Ideale Gasgemische	19/1
Feuchte Luft	20/1
Eindimensionale stationäre Diffusion ( $D_{AB} = \text{const}$ )	21/1
Konvektiver Stoffübergang	22/1
Eindimensionaler stationärer Stoffdurchgang ( $D_{AB}, \beta_{AB} = \text{const}$ )	23/1

# Schaltbilder für Bauelemente der Energietechnik (DIN 2481)

Wärmeüber-  
trager als  
Rekuperator  
allgemein  
(Wärme-  
tauscher)



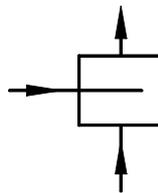
Verdampfer  
(Kessel)



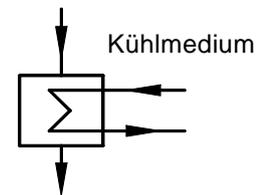
Verdampfer (Kessel)  
mit Überhitzer



Mischwärme-  
übertrager



Kondensator



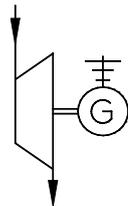
Verdichter  
allgemein



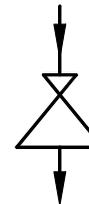
Pumpe  
allgemein



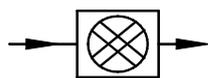
Turbine mit  
Generator  
- Dampfturbine  
- Gasturbine  
- Wasserturbine



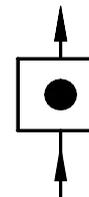
Drosselventil  
(Druckminder-  
ventil)



Brennkammer  
für Gase



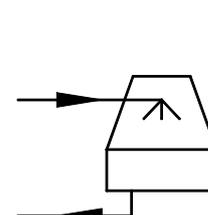
Kernreaktor



Wärmever-  
braucher  
mit Heizflächen

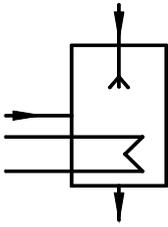


Kühlturm

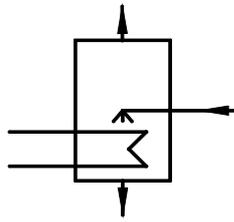


## Schaltbilder für weitere Bauelemente (DIN 2481)

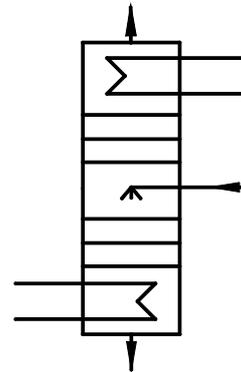
Absorber



Austreiber (Kocher)



Gekoppelte Rektifiziersäule



## Rohrleitungen für Schaltungen der Energietechnik (DIN 2481)

Wasser



Luft



Verbrennungsgase



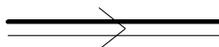
Dampf



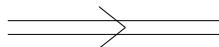
Feste Brennstoffe



Brenngase



Heizöl



## Kreisprozesse (stationär, $\dot{m} = \text{const}$ )

Kreisprozessarbeitsleistung  $P_{KP} = P_{tzu} + P_{tab}$  (18.1),

$$P_{KP} = -\dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} \quad (18.2)$$

Mittlere Temperatur bei Wärmezufuhr:  $T_{qzu}^m = \frac{q_{zu}}{\Delta s_{qzu}}$  (18.3),

$$q_{zu} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{m}} \quad (18.4)$$

$\Delta s_{qzu}$  - spezif. Entropiedifferenz bei Wärmezufuhr

Mittlere Temperatur bei Wärmeabfuhr:  $T_{qab}^m = \frac{q_{ab}}{\Delta s_{qab}}$  (18.5)

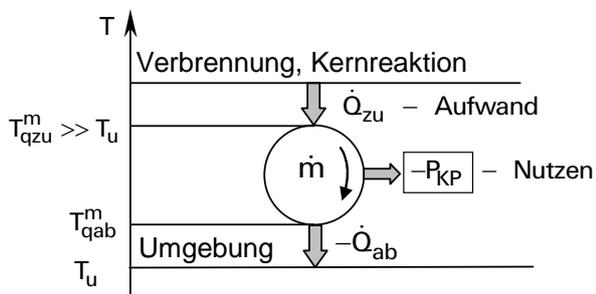
$$q_{ab} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{m}} \quad (18.6)$$

$\Delta s_{qab}$  - spezif. Entropiedifferenz bei Wärmeabfuhr

### Rechtsprozesse

#### Wärme­kraft­ma­chine (WKM) und Ver­bren­nungs­kraft­ma­chine (VKM)

→ Gewinnung von Arbeit



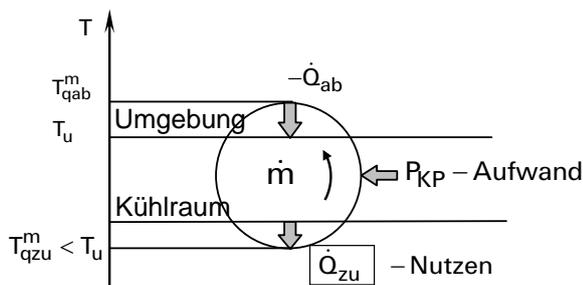
**Thermischer Wirkungsgrad**  $\eta_{th}$  des Kreisprozesses

$$\eta_{th} = \frac{-P_{KP}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (18.7) \quad \eta_{th} < 1$$

$$\eta_{th}^{C,analog} = \frac{T_{qzu}^m - T_{qab}^m}{T_{qzu}^m}; \quad v_{th} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th}^{C,analog}} \leq 1 \quad (18.8) \quad (18.9)$$

### Linksprozesse

#### Kältemaschine (KM)



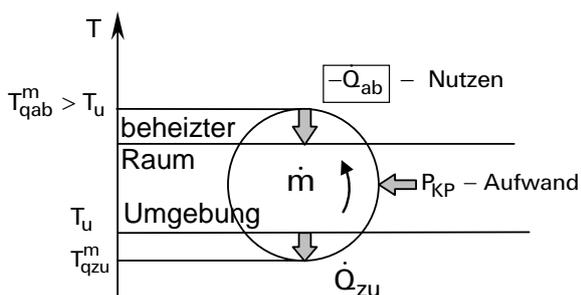
→ Aufnahme von Wärme  $\dot{Q}_{zu}$  unterhalb  $T_u$

**Leistungszahl**  $\varepsilon_{KM}$  des Kreisprozesses

$$\varepsilon_{KM} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{P_{KP}} = \frac{-\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}} \quad (18.10) \quad \varepsilon_{KM} \geq 1$$

$$\varepsilon_{KM}^{C,analog} = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}; \quad v_{KM} = \frac{\varepsilon_{KM}}{\varepsilon_{KM}^{C,analog}} \leq 1 \quad (18.11) \quad (18.12)$$

#### Wärmepumpe (WP)



→ Abgabe von Wärme  $-\dot{Q}_{ab}$  oberhalb  $T_u$

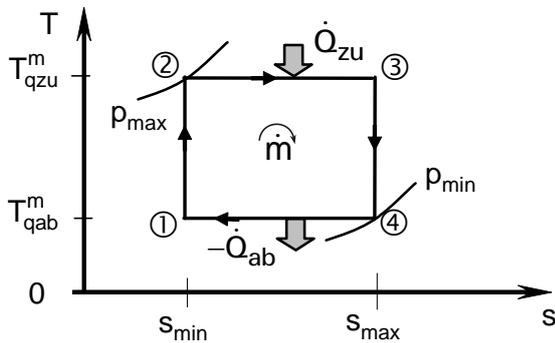
**Leistungszahl**  $\varepsilon_{WP}$  des Kreisprozesses

$$\varepsilon_{WP} = \frac{-\dot{Q}_{ab}}{P_{KP}} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab}} \quad (18.13) \quad \varepsilon_{WP} > 1$$

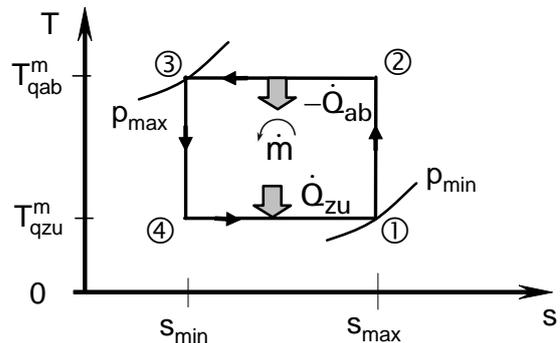
$$\varepsilon_{WP}^{C,analog} = \frac{T_{qab}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m}; \quad v_{WP} = \frac{\varepsilon_{WP}}{\varepsilon_{WP}^{C,analog}} \leq 1 \quad (18.14) \quad (18.15)$$

# CARNOT-Prozess – theoretischer Vergleichsprozess

CARNOT-Rechtsprozess



CARNOT-Linksprozess



$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot T_{qzu}^m \cdot (s_{max} - s_{min}) \quad (18.16)$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m} \cdot T_{qab}^m \cdot (s_{min} - s_{max}) \quad (18.17)$$

$$P_{KP} = -\dot{m} \cdot (T_{qzu}^m - T_{qab}^m) \cdot (s_{max} - s_{min}) \quad (18.18)$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot T_{qzu}^m \cdot (s_{max} - s_{min}) \quad (18.19)$$

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m} \cdot T_{qab}^m \cdot (s_{min} - s_{max}) \quad (18.20)$$

$$P_{KP} = \dot{m} \cdot (T_{qab}^m - T_{qzu}^m) \cdot (s_{max} - s_{min}) \quad (18.21)$$

$$\eta_{th}^C = \frac{T_{qzu}^m - T_{qab}^m}{T_{qzu}^m} \quad (18.22)$$

Kältemaschine  
KM

$$\varepsilon_{KM}^C = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m} \quad (18.23)$$

Wärmepumpe  
WP

$$\varepsilon_{WP}^C = \frac{T_{qab}^m}{T_{qab}^m - T_{qzu}^m} \quad (18.24)$$

CARNOT-Rechtsprozess mit idealem Gas:

mit:  $\tau = \frac{T_{qzu}^m}{T_{qab}^m}$  (18.25),  $\pi = \frac{p_{max}}{p_{min}}$  (18.26)

$$\dot{Q}_{zu} = -\dot{m} \cdot R \cdot T_{qzu}^m \cdot \left( \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau - \ln \pi \right) \quad (18.27)$$

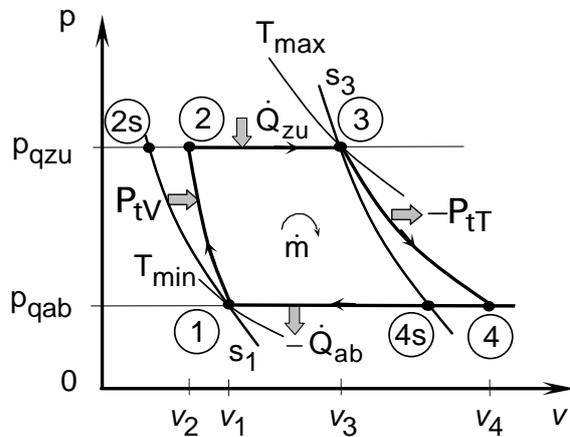
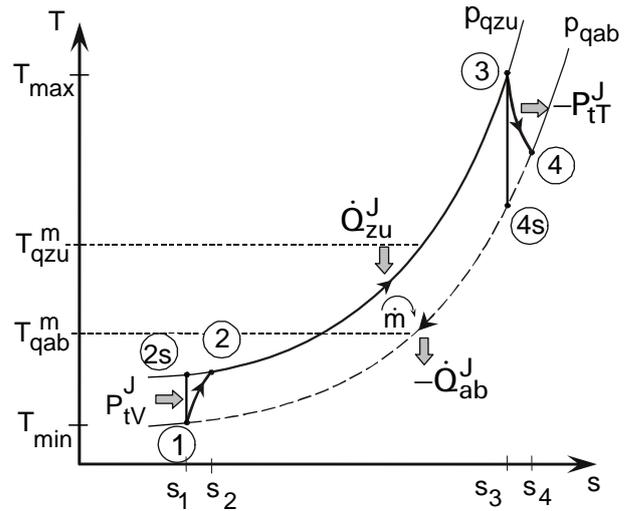
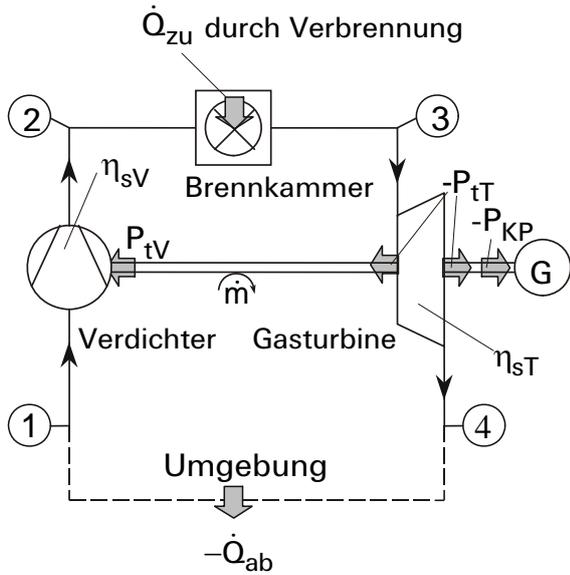
$$\dot{Q}_{ab} = -\dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m \cdot \left( \ln \pi - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau \right) \quad (18.28)$$

$$P_{KP} = \dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m (\tau - 1) \cdot \left( \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \tau - \ln \pi \right) \quad (18.29)$$

Dimensionslose KP-Arbeit:  $\omega_{KP} = \frac{P_{KP}}{\dot{m} \cdot R \cdot T_{qab}^m}$  (18.30)

$$\omega_{KP}^C = (1 - \tau) \cdot \left( \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \ln \tau - \ln \pi \right) \quad (18.31)$$

# Gasturbinen-JOULE-Rechtsprozess (stationär)



$$\dot{Q}_{zu}^J = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (18.32)$$

$$\dot{Q}_{ab}^J = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (18.33)$$

$$P_{KP}^J = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 - h_3 + h_4) \quad (18.35)$$


---


$$\eta_{th}^J = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (18.38)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{\eta_{sV}} \cdot (h_{2s} - h_1) \quad (18.34)$$

$$h_4 = h_3 + \eta_{sT} \cdot (h_{4s} - h_3) \quad (18.36)$$

$$P_{tT}^J = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) \quad (18.37)$$

$$P_{tV}^J = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (18.39)$$

## Reversibler Gasturbinen-JOULE-Rechtsprozess:

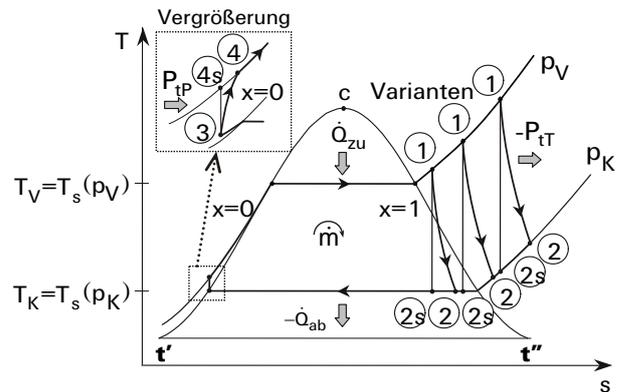
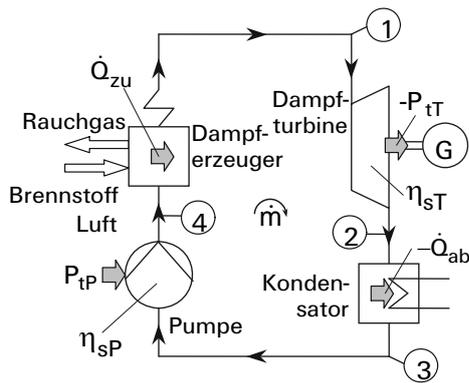
- reversible Verdichtung  $\eta_{sV} = 1 \rightarrow \textcircled{2} = \textcircled{2s}$

- reversible Turbinenentspannung  $\eta_{sT} = 1 \rightarrow \textcircled{4} = \textcircled{4s}$

$$\eta_{th,rev}^J = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \pi^{-\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)} \quad (18.40) \quad \pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_{qzu}}{p_{qab}} \quad (18.41) \quad , \quad \tau = \frac{T_3}{T_1} = \frac{T_{max}}{T_{min}} \quad (18.42)$$

Dimensionslose KP-Arbeit:  $\omega_{rev}^J = \frac{-P_{KP}^J}{\dot{m} \cdot R \cdot T_{min}} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \left( \tau - \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \cdot \left( 1 - \pi^{-\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)} \right) \quad (18.43)$

# Dampfturbinenanlagen - CLAUSIUS-RANKINE-Rechtsprozess (stationär)



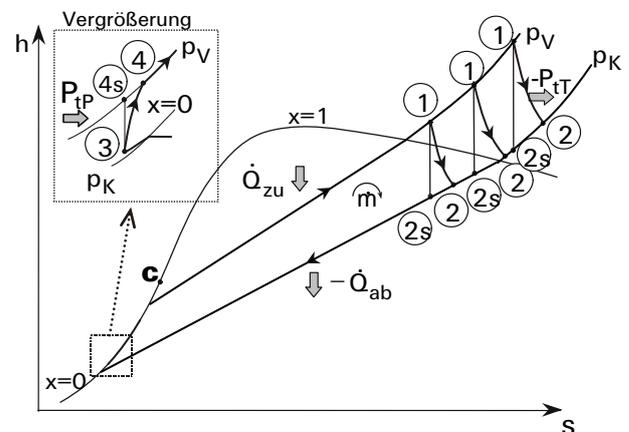
$$\dot{Q}_{zu}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (18.44)$$

$$h_4 = h_3 + \frac{1}{\eta_{sP}} \cdot (h_{4s} - h_3) \quad (18.45),$$

$$h_{4s} = f(p_V, s_3) \quad (18.46)$$

$$\dot{Q}_{ab}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (18.47)$$

$$h_2 = h_1 + \eta_{sT} \cdot (h_{2s} - h_1) \quad (18.48)$$



Für Ermittlung von  $h_{2s} \Rightarrow$  Unterscheidung

$s_1 \leq s''(p_K) \Rightarrow \textcircled{2s}$ im Nassdampfgebiet $h_{2s} = h'(p_K) + x_{2s} \cdot [h''(p_K) - h'(p_K)] \quad (18.49)$ mit $x_{2s} = \frac{s_1 - s'(p_K)}{s''(p_K) - s'(p_K)} \quad (18.50)$
--

$s_1 > s''(p_K) \Rightarrow \textcircled{2s}$ im überh. Dampfgebiet $h_{2s} = f(p_K, s_1)$ Interpolation $(18.51)$
---

$$P_{KP}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 + h_4 - h_3) \quad (18.52)$$

$$P_{tT}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (18.53), \quad P_{tP}^{CR} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) \quad (18.54)$$

Näherung für ideale Flüssigkeit:

$$P_{tP}^{CR} = \frac{1}{\eta_{sP}} \cdot \dot{m} \cdot v_3 \cdot (p_V - p_K) \quad (18.55)$$

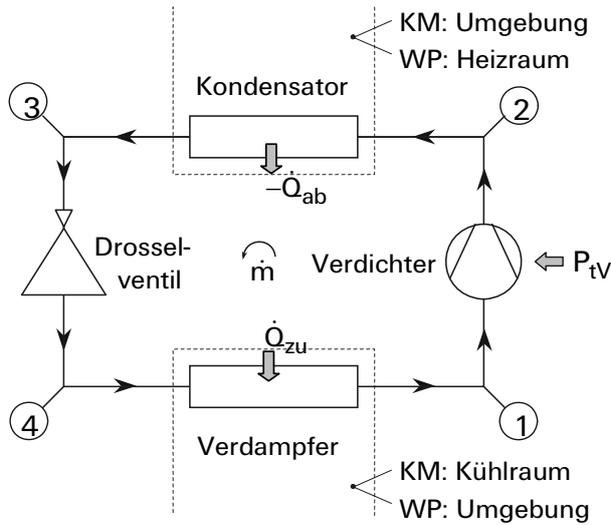
$$\eta_{th}^{CR} = 1 + \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_4} \quad (18.56)$$

## Zugeführter Wärmestrom im Verdampfer

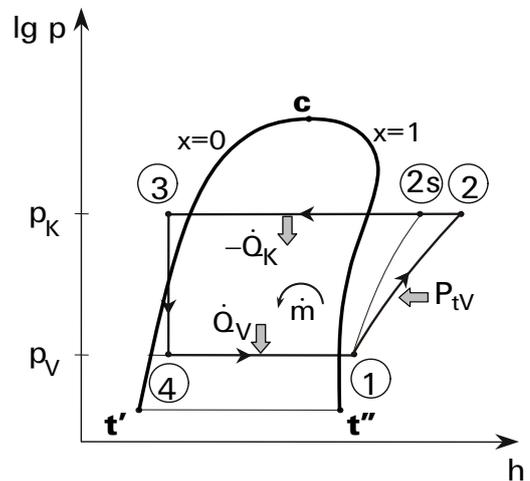
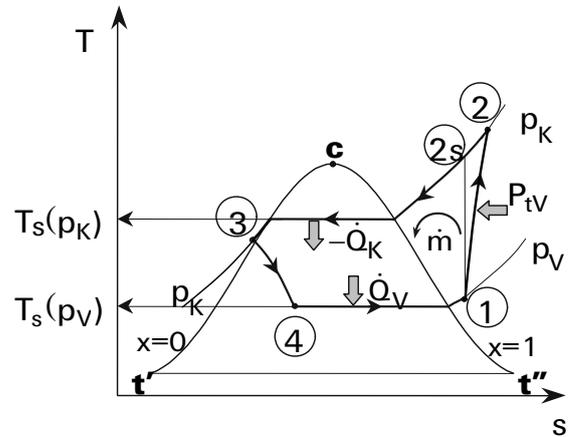
$$\dot{Q}_{zu}^{CR} = \eta_{DE} \cdot \dot{m}_B \cdot \Delta_H h_B \quad (18.57)$$

- $\dot{m}_B$  - Massestrom Brennstoff
- $\Delta_H h_B$  - Heizwert des Brennstoffs
- $\eta_{DE}$  - Wirkungsgrad des Verdampfers

# Kältemaschinen und Wärmepumpen - CLAUSIUS-RANKINE-Linksprozess (stationär)



KM - Kältemaschine  
WP - Wärmepumpe



$$\dot{Q}_V^L = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (18.58) \quad h_4 = h_3 \quad (18.59)$$

$$\dot{Q}_K^L = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (18.60) \quad h_2 = h_1 + \frac{1}{\eta_{sV}} (h_{2s} - h_1) \quad (18.61), \quad h_{2s} = f(p_K, s_1) \quad (18.62)$$

$$P_{KP}^L = P_{tV} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (18.63)$$

## Kältemaschine

$$\varepsilon_{KM}^L = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (18.64)$$

## Kälteleistung

$$\dot{Q}_O = \dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (18.66)$$

## Wärmepumpe

$$\varepsilon_{WP}^L = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (18.65)$$

## Heizleistung

$$\dot{Q}_H = |\dot{Q}_{ab}| = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (18.67)$$

# Ideale Gasgemische

## Gemischzusammensetzung unabhängig von Gemischart

Masseanteil des Gemischgases i:  $\xi_i := \frac{m_i}{m^*}$  (19.1)  $i=1\dots N$ ,  $m^* = \sum_i^N m_i$  (19.2)  $\sum_i^N \xi_i = 1$  (19.3)

Molanteil des Gemischgases i:  $\psi_i := \frac{n_i}{n^*}$  (19.4)  $i=1\dots N$ ,  $n^* = \sum_i^N n_i$  (19.5)  $\sum_i^N \psi_i = 1$  (19.6)

Umrechnungen:  $\psi_i = \frac{R_i}{R^*} \cdot \xi_i$  (19.7) und  $\xi_i = \frac{M_i}{M^*} \cdot \psi_i$  (19.8)

mit  $\frac{R_i}{R^*} = \frac{M^*}{M_i}$  (19.9)

Molare Masse des Gemisches:  $M^* = \sum_i^N (\psi_i \cdot M_i)$  (19.10)  $M^* = \frac{m^*}{n^*}$  (19.11)

Spezifische Gaskonstante des Gemisches:  $R^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot R_i)$  (19.12)  $R^* = \frac{\bar{R}}{M^*}$  (19.13)

Spezifische Gaskonstante des Gemischgases i:  $R_i = \frac{\bar{R}}{M_i}$  (19.14)

## Thermische Zustandsgrößen idealer Gasgemische

Gemisch:  $p^* \cdot v^* = R^* \cdot T$  (19.15)  $p^* \cdot V^* = m^* \cdot R^* \cdot T$  (19.16)  
 $p^* \cdot V^* = n^* \cdot \bar{R} \cdot T$  (19.17)

Gesamtdruck:  $p^* = \sum_i^N p_i$  (19.18)  $p_i$  - Partialdruck des Gemischgases i  
mit  $p_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T}{V^*}$  (19.19)  
 $p_i = \psi_i \cdot p^*$  (19.20)

Raumanteil des Gemischgases i:  $r_i := \frac{V_i}{V^*} = \psi_i$  (19.21)  $V_i$  - Volumen des Gemischgases i  
mit  $V_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T}{p^*}$  (19.22)  
 $V_i = \psi_i \cdot V^*$  (19.23)

Spez. Volumen des Gemisches:  $v^* = \frac{R^* \cdot T}{p^*}$  (19.24)

$v^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot v_i)$  (19.25) mit  $v_i = \frac{R_i \cdot T}{p^*}$  (19.26)

Dichte des Gemisches:  $\rho^* = \frac{p^*}{R^* \cdot T}$  (19.27)

$\rho^* = \frac{1}{\sum_i^N \left( \xi_i \cdot \frac{1}{\rho_i} \right)}$  (19.28) mit  $\rho_i = \frac{p^*}{R_i \cdot T}$  (19.29)

## Energetische Zustandsgrößen idealer Gasgemische

### Spezifische Wärmekapazitäten:

$$c_p^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot c_{pi}) \quad (19.30) \quad \text{und} \quad c_v^* = c_p^* - R^* \quad (19.31)$$

$c_{pi}$  ↗ Stoffwerte

### Isentropenexponent:

$$\kappa^* = \frac{c_p^*}{c_p^* - R^*} \quad (19.32)$$

### Spezifische Enthalpie:

$$h^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot h_i) \quad (19.33)$$

$h_i = f(T)$  ↗ Stoffwerte

Näherung:  $c_{pmi}^{ig} = \text{const}$

$$h^* = h_o^* + c_{pm}^* \cdot (T - T_o) \quad (19.34)$$

$$\text{mit } h_o^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot h_{oi}^{ig}) \quad (19.35) \quad \text{und} \quad c_{pm}^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot c_{pmi}^{ig}) \quad (19.36)$$

Differenz für Zustandsänderung ① → ② bei  $\xi_i = \text{const}$

$$h_2 - h_1 = \sum_i^N [\xi_i (h_{i2} - h_{i1})] \quad (19.37)$$

Näherung: Mittelwerte  $c_{pmi}^{ig} = \text{const}$

$$h_2 - h_1 = c_{pm}^* (T_2 - T_1) \quad (19.38)$$

$$c_{pm}^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot c_{pmi}^{ig}) \quad (19.39)$$

**Spezifische Entropie:**

$$\text{allg.: } s^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot s_i) + \Delta s_{\text{irr}}^* \quad (19.40)$$

Irreversible Mischungsentropie:

$$\Delta s_{\text{irr}}^* = - \sum_i^N (\xi_i \cdot R_i \cdot \ln \psi_i) = -R^* \cdot \sum_i^N (\psi_i \cdot \ln \psi_i) \quad (19.41)$$

$$s^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot s_{Ti}^{\text{ig}}) - R^* \cdot \ln \left( \frac{p^*}{p_0} \right) + \Delta s_{\text{irr}}^* \quad (19.42)$$

$s_{Ti}^{\text{ig}} = f(T)$  ↗ Stoffwerte

Näherung:  $c_{pmi}^{\text{ig}} = \text{const}$

$$s^* = s_0^* + c_{pm}^* \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - R^* \cdot \ln \left( \frac{p^*}{p_0} \right) + \Delta s_{\text{irr}}^* \quad (19.43)$$

$$\text{mit } s_0^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot s_{oi}^{\text{ig}}) \quad (19.44) \quad \text{und } c_{pm}^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot c_{pmi}^{\text{ig}}) \quad (19.45)$$

Differenz für Zustandsänderung ① → ② bei  $\xi_i = \text{const}$

$$s_2 - s_1 = \sum_i^N \left[ \xi_i \cdot \left( s_{Ti}^{\text{ig}}(T_2) - s_{Ti}^{\text{ig}}(T_1) \right) - R^* \cdot \ln \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right) \right] \quad (19.46)$$

$s_{Ti}^{\text{ig}}(T_2), s_{Ti}^{\text{ig}}(T_1)$  ↗ Stoffwerte

Näherung:  $c_{pmi}^{\text{ig}} = \text{const}$

$$s_2 - s_1 = c_{pm}^* \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R^* \cdot \ln \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right) \quad (19.47)$$

$$c_{pm}^* = \sum_i^N (\xi_i \cdot c_{pmi}^{\text{ig}}) \quad (19.48)$$

**Spezifische innere Energie:**

$$u^* = h^* - R^* \cdot T \quad (19.49)$$

**Spezifische Exergie:**

$$e^* = \left( h^* - h_u^* \right) - T_u \cdot \left( s^* - s_u^* \right) \quad (19.50)$$

## Feuchte Luft

### Konstanten zur Berechnung

#### Gesamtdruck der feuchten Luft:

Mittelwert:  $p \approx p_n = 101,325 \text{ kPa}$

Mit Einbeziehung der Höhe  $z_{\text{geo}}$  über Meeresspiegel:

$$p = p_n \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot z_{\text{geo}})^{5,256} \quad (20.1)$$

**Trockene Luft:**  $R_L = 0,28710 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  ,  $c_{pL} = 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Bezugszustand:  $T_o = 273,15 \text{ K}$  ,  $\vartheta_o = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$p_{oL} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$h_{oL} = 0 \text{ , } s_{oL} = 0,16196 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

**Wasser:**  $R_W = 0,46153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Wasserdampf:  $c_{pD} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Wasserflüssigkeit:  $c_{pF} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  ,  $v_F = 0,0010018 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $\frac{dv_F}{dT} = 2,07 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Wassereis:  $c_{pE} = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  ,  $v_E = 0,0010844 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Bezugszustand: Tripelzustand auf Siedelinie

$$T_o = 273,15 \text{ K} \text{ , } \vartheta_o = 0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ , } p_{oW} = 0,61121 \text{ kPa}$$

$$h_{oW} \approx 0 \text{ , } s_{oW} \approx 0 \text{ , } v_{oF} = 0,00100 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Verdampfungsenthalpie bei } T_o: \Delta h_{lv}^o = 2500,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Verdampfungsentropie bei } T_o: \Delta s_{lv}^o = 9,1559 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Schmelzenthalpie bei } T_o: \Delta h_{sl}^o = 334,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Schmelzentropie bei } T_o: \Delta s_{sl}^o = 1,2229 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

#### Konstanten für Berechnung feuchter Rauchgase:

Ersetzen  $\Rightarrow$  statt trockene Luft (L)  $\Rightarrow$  Rauchgasgemisch (G) mit Masseanteilen  $\xi_i$ :

$$R_L \equiv R_G = \sum_i (\xi_i \cdot R_i) \quad (20.2) \quad c_{pL} \equiv c_{pG} = \sum_i (\xi_i \cdot c_{pi}) \quad (20.3)$$

## Zusammensetzung der feuchten Luft

Masse der feuchten Luft:  $m = m_L + m_W$  (20.4),

$$R = \xi_L \cdot R_L + \xi_W \cdot R_W \quad (20.5), \quad M = \psi_L \cdot M_L + \psi_W \cdot M_W \quad (20.6)$$

Wassergehalt  
(Absolute  
Feuchte)

$$x_W = \frac{m_W}{m_L} \quad (20.7)$$

$$[x_W] = 1 \frac{\text{kg (Wasser)}}{\text{kg (trockene Luft)}}$$

Masseanteile:

$$\xi_W = \frac{x_W}{(1 + x_W)} ; \quad \xi_L = 1 - \xi_W \quad (20.8)$$

$$[\xi_W] = 1 \frac{\text{kg (Wasser)}}{\text{kg (feuchte Luft)}}$$

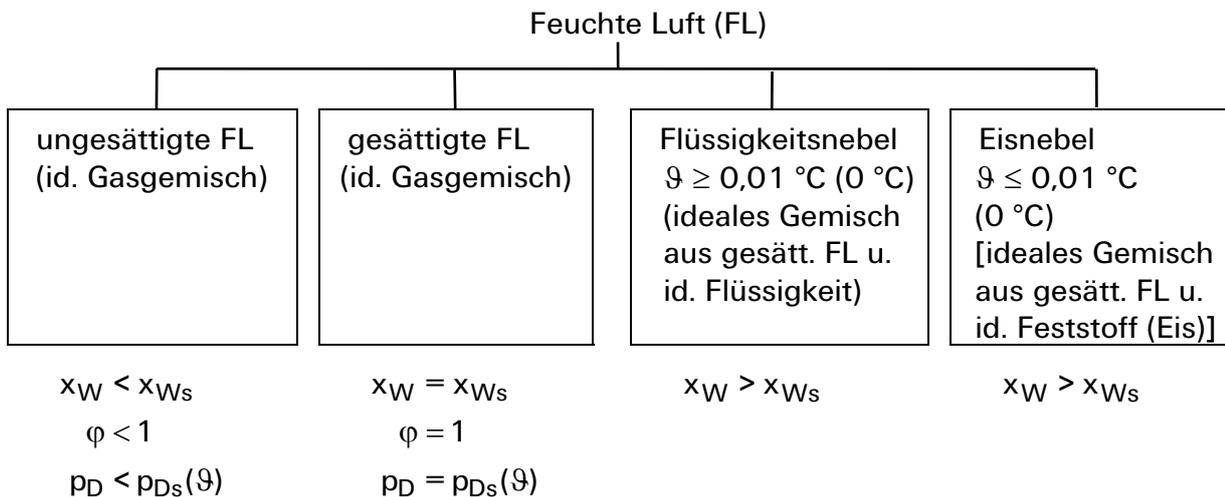
Molanteile:  $\psi_W = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \quad (20.9);$

$$\psi_L = 1 - \psi_W \quad (20.10)$$

Masse der  
trockenen Luft

$$m_L = \frac{m}{(1 + x_W)} \quad (20.11)$$

$$[\psi_W] = 1 \frac{\text{kmol (Wasser)}}{\text{kmol (feuchte Luft)}}$$



**Ungesättigte feuchte Luft:**

Gesamtdruck:  $p = p_L + p_D$  (20.12)

Partialdrücke des Wasserdampfes und der tr. Luft

$$p_D = \psi_W \cdot p = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \cdot p$$

(20.13)

$$p_L = p - p_D$$

(20.14)

**Gesättigte feuchte Luft:**

$$p_D = p_{Ds}(\vartheta) \quad (20.15)$$

$$p_L = p - p_{Ds}(\vartheta) \quad (20.16)$$

Relative Feuchte:

$$\varphi := \frac{\psi_W}{\psi_{Ws}} = \frac{p_D}{p_{Ds}}$$

(20.17)

$$\varphi = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \cdot \frac{p}{p_{Ds}(\vartheta)}$$

(20.18)

$$\varphi = 1$$

Bei  $\vartheta \geq 0,01 \text{ °C}$  ( $0 \text{ °C}$ ) Sättigungsdruck des Wasserdampfes  $p_{Ds}(\vartheta) = p_s(\vartheta) \nearrow$  WDT

Bei  $\vartheta < 0,01 \text{ °C}$  ( $0 \text{ °C}$ ) Sublimationsdruck des Wasserdampfes  $p_{Ds}(\vartheta) = p_{subl}(\vartheta) \nearrow$  SW

Wassergehalt:

$$x_W = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_D}{(p - p_D)} = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{Ds}(\vartheta)}{(p - \varphi \cdot p_{Ds}(\vartheta))}$$

(20.19)

$$x_{Ws} = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_{Ds}(\vartheta)}{(p - p_{Ds}(\vartheta))}$$

(20.20)

**Luftspezifisches Volumen**  $v_{1+x} = \frac{V}{m_L}$  (20.21)  $\Rightarrow v = \frac{v_{1+x}}{1+x_W}$  (20.22)  $\rho = \frac{1+x_W}{v_{1+x}}$  (20.23)

Ungesätt. u. gesätt. FL:  
( $x_W \leq x_{Ws}$ )

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_W \cdot R_W) \quad (20.24)$$

Flüssigkeitsnebel:  
( $x_W > x_{Ws}$ ,  $\vartheta \geq 0,01 \text{ °C}$ )

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_{Ws} \cdot R_W) + (x_W - x_{Ws}) \cdot v_F \quad (20.25)$$

Eisnebel:  
( $x_W > x_{Ws}$ ,  $\vartheta < 0,01 \text{ °C}$ )

$$v_{1+x} = \frac{T}{p} \cdot (R_L + x_{Ws} \cdot R_W) + (x_W - x_{Ws}) \cdot v_E \quad (20.26)$$

**Luftspez. Enthalpie u. Entropie:**  $h_{1+x} = \frac{H}{m_L}$ ,  $s_{1+x} = \frac{S}{m_L} \Rightarrow h = \frac{h_{1+x}}{1+x_W}$ ,  $s = \frac{s_{1+x}}{1+x_W}$   
 (20.27) (20.28) (20.29) (20.30)

**Ungesätt. und gesätt. FL** ( $x_W \leq x_{Ws}$ ):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta\vartheta + x_W \cdot (\Delta h_{iv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta\vartheta) \quad (20.31) \quad \text{mit} \quad \Delta\vartheta = (\vartheta - \vartheta_0), \quad \vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_W \cdot \left[ \Delta s_{iv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (1+x_W) \cdot \Delta s_{irr} \quad (20.32)$$

Irreversible Mischungsentropie:

$$\Delta s_{irr} = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_W \cdot R_W \cdot \ln \psi_W \quad (20.33)$$

alternativ:

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p_L}{p_{oL}}\right) + x_W \cdot \left[ \Delta s_{iv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p_D}{p_{oW}}\right) \right] \quad (20.34)$$

**Flüssigkeitsnebel** ( $x_W > x_{Ws}$ ,  $\vartheta \geq 0,01^\circ\text{C}$ ):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta\vartheta + x_{Ws} \cdot (\Delta h_{iv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta\vartheta) + (x_W - x_{Ws}) \cdot c_{pF} \cdot \Delta\vartheta \quad (20.35) \quad \text{mit} \quad \Delta\vartheta = (\vartheta - \vartheta_0), \quad \vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_{Ws} \cdot \left[ \Delta s_{iv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (x_W - x_{Ws}) \cdot \left[ c_{pF} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{dv_F}{dT} \cdot (p - p_{oW}) \right] + (1+x_{Ws}) \cdot \Delta s_{irr}^s \quad (20.36)$$

Irreversible Mischungsentropie der gesättigten feuchten Luft:

$$\Delta s_{irr}^s = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_{Ws} \cdot R_W \cdot \ln \psi_{Ws} \quad (20.37)$$

**Eisnebel** ( $x_W > x_{Ws}$ ,  $\vartheta \leq 0,01^\circ\text{C}$ ):

$$h_{1+x} = c_{pL} \cdot \Delta\vartheta + x_{Ws} \cdot (\Delta h_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta\vartheta) + (x_W - x_{Ws}) \cdot (-\Delta h_{sl}^\circ + c_{pE} \cdot \Delta\vartheta) \quad \begin{matrix} \Delta\vartheta = (\vartheta - \vartheta_0) \\ \vartheta_0 = 0^\circ\text{C} \end{matrix} \quad (20.38)$$

$$s_{1+x} = s_{oL} + c_{pL} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_L \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oL}}\right) + x_{Ws} \cdot \left[ \Delta s_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_W \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{oW}}\right) \right] + (20.39)$$

$$+ (x_W - x_{Ws}) \cdot \left[ -\Delta s_{sl}^\circ + c_{pE} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] + (1 + x_{Ws}) \cdot \Delta s_{irr}^s$$

Irreversible Mischungsentropie der gesättigten feuchten Luft:

$$\Delta s_{irr}^s = -\xi_L \cdot R_L \cdot \ln \psi_L - \xi_{Ws} \cdot R_W \cdot \ln \psi_{Ws} \quad (20.40)$$

**Taupunkttemperatur:**

$$\underset{\nearrow \text{WDT}}{\vartheta_\tau = \vartheta_{Ds}(p_D)} \quad (20.41) \quad \text{mit} \quad p_D = \frac{x_W}{\frac{R_L}{R_W} + x_W} \cdot p \quad (20.42)$$

**Feuchtkugeltemperatur:**  $\vartheta_\varphi$  auf  $\varphi = 1$  über verlängerte Nebelisotheime  $\vartheta_\varphi$

→ Berechnung von  $\vartheta_\varphi$  aus  $\vartheta$  und  $x_W$  iterativ möglich aus:

$$h_{1+x}^{\text{unges}}(\vartheta, x_W) = h_{1+x}^{\text{Nebel}}(\vartheta_\varphi, x_W) \quad (20.43)$$

Berechnung von  $x_W$  aus  $\vartheta_\varphi$  und  $\vartheta$ :

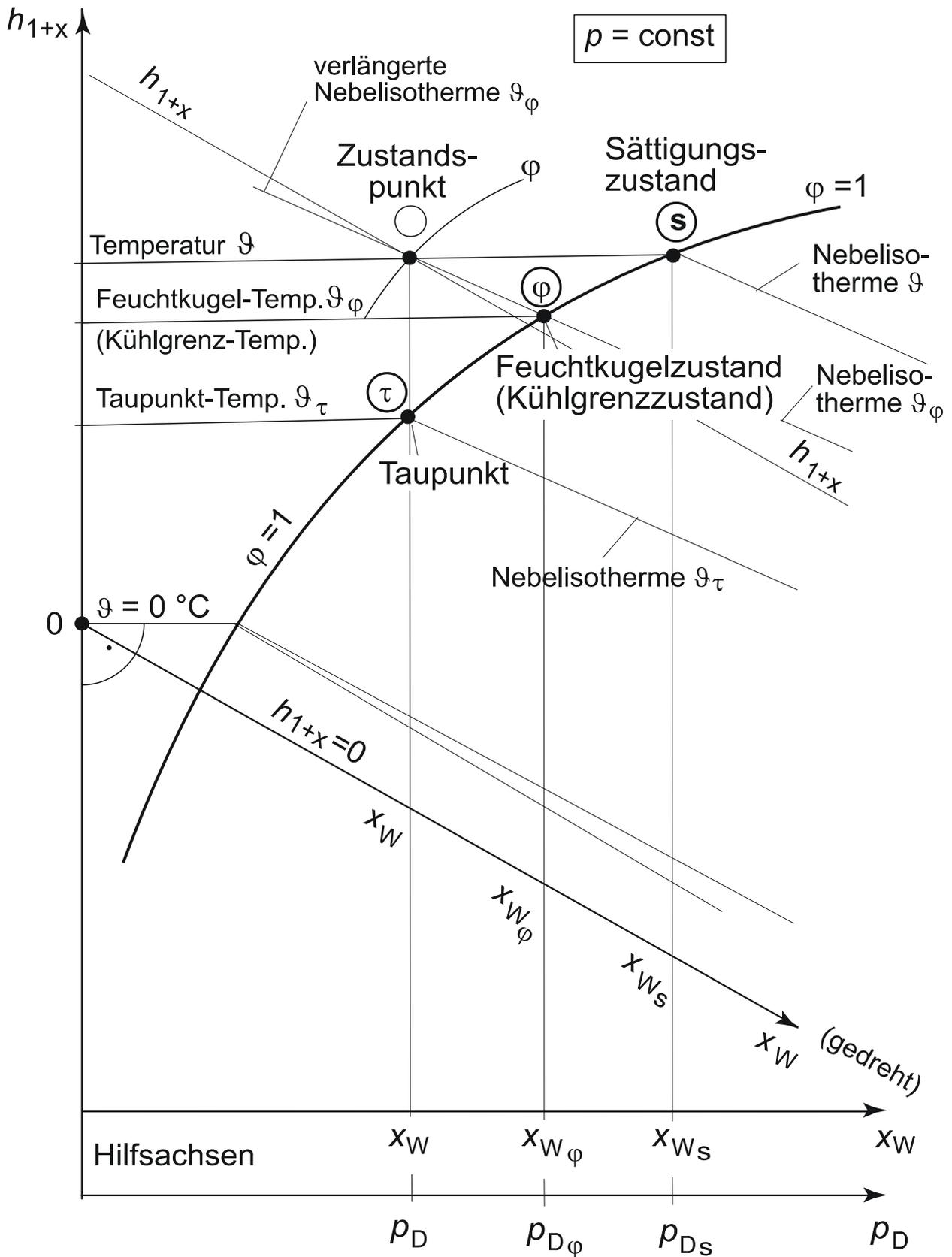
$$x_W = \frac{c_{pL} \cdot (\Delta\vartheta_\varphi - \Delta\vartheta) + x_{Ws}(\vartheta_\varphi) \cdot [\Delta h_{lv}^\circ + (c_{pD} - c_{pF}) \cdot \Delta\vartheta_\varphi]}{\Delta h_{lv}^\circ + c_{pD} \cdot \Delta\vartheta - c_{pF} \cdot \Delta\vartheta_\varphi} \quad (20.44)$$

$$x_{Ws}(\vartheta_\varphi) = \frac{R_L}{R_W} \cdot \frac{p_{Ds}(\vartheta_\varphi)}{p - p_{Ds}(\vartheta_\varphi)} \quad \text{wobei} \quad p_{Ds}(\vartheta_\varphi) = p_s(\vartheta_\varphi) \nearrow \text{WDT} \quad (20.45)$$

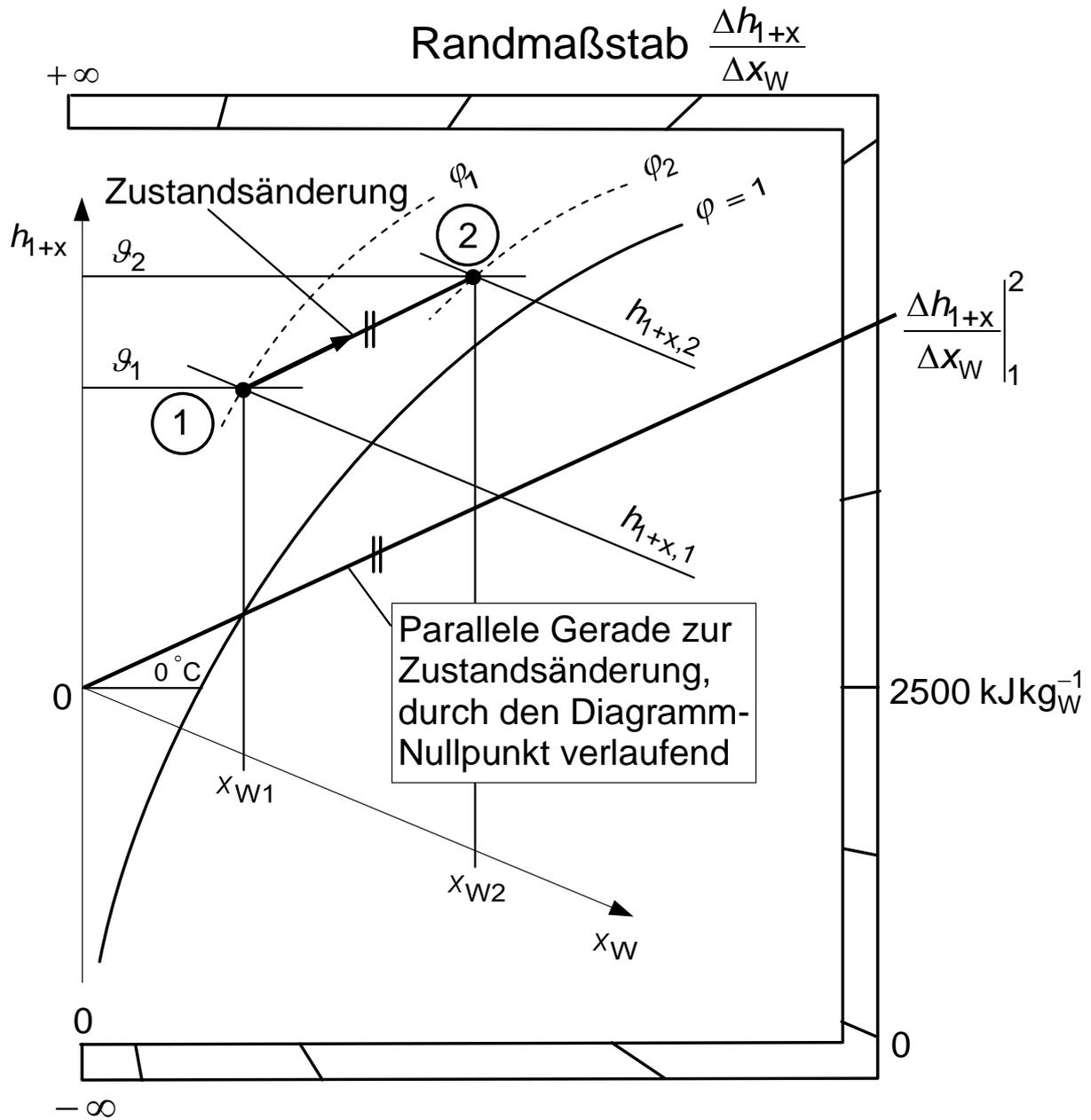
mit  $\Delta\vartheta = (\vartheta - \vartheta_0)$ ,  $\Delta\vartheta_\varphi = (\vartheta_\varphi - \vartheta_0)$ ,  $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$

$$\text{daraus: } \varphi = \frac{x_W}{\left(\frac{R_L}{R_W} + x_W\right)} \cdot \frac{p}{p_{Ds}(\vartheta)} \quad (20.46)$$

# $h_{1+x}, x_w$ -Diagramm



### Richtung der Zustandsänderung im $h_{1+x}, x_w$ -Diagramm



## Eindimensionale stationäre Diffusion ( $D_{AB} = \text{const}$ )

Gleichung des Konzentrationsfeldes:  $\text{divgrad } c_A = 0$  (21.1)

Diffusionsstromdichte:  $\hat{n}_A = -D_{AB} \cdot \text{grad } c_A$  (21.2)  $D_{AB}$  - Diffusionskoeffizient für Zweistoffgemisch aus Stoffen A und B  
(Betrag)  $\nearrow$  Stoffwerte

$$\hat{n}_A = \frac{\dot{n}_A}{A} \quad (21.3)$$

$$c_A = \frac{n_A}{V^*} \quad (21.4)$$

$c_A$  - molare Konzentration von A im Gemisch

$V^*$  - Gemischvolumen

Diffusionsmolstrom durch Schicht:  $\dot{n}_A = \frac{\Delta c_A}{R_{DAB}}$  (21.5)

$$\Delta c_A = |c_{A0} - c_{A\delta}| \quad (21.6)$$

Diffusionswiderstand:  $R_{DAB} = \frac{\delta}{D_{AB} \cdot A_m}$  (21.7)

$\delta$  - Schichtdicke

$A_m$  - mittlere vom Stoffstrom durchdrungene Fläche

Mehrere Schichten:

$$R_{DAB} = \sum_j R_{DAB_j} \quad (21.8)$$

Diffusionsmassenstrom durch Schicht:  $\dot{m}_A = \dot{n}_A \cdot M_A$  (21.9)

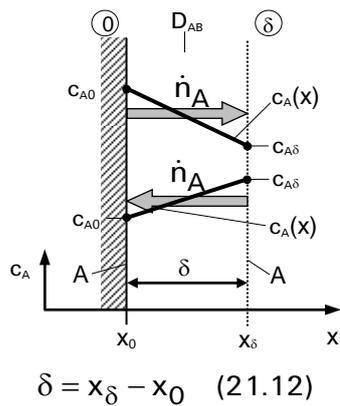
$M_A$  - molare Masse des Stoffes A

Diffusionsmassenstromdichte durch Schicht:  $\hat{m}_A = \hat{n}_A \cdot M_A$  (21.10)

## Flüssigkeitsfilm der Dicke $\delta$ an Wand

Flüssigkeitsfilm an ebener Wand:

$$\text{grad } c_A = \frac{dc_A}{dx} \quad (21.11)$$



Konzentrationsverlauf (linear)

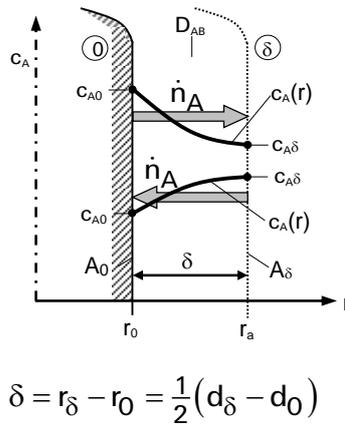
$$c_A(x) = c_{A0} - (c_{A0} - c_{A\delta}) \cdot \frac{(x - x_0)}{\delta} \quad (21.13)$$

$$A_m^{Eb} = a \cdot b = A_0 = A_\delta = A = \text{const} \quad (21.14)$$

→ Näherung für wandartige Gebilde

Flüssigkeitsfilm an Zylinderwand:  
(Rohr, Hohlzylinder o. ä. mit Länge l)

$$\text{grad } c_A = \frac{dc_A}{dr} \quad (21.15)$$



Konzentrationsverlauf (logarithmisch)

$$c_A(r) = c_{A0} - (c_{A0} - c_{A\delta}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{r_\delta}{r_0}\right)} \quad (21.16)$$

$$A_m^{Zyl} = \pi \cdot l \cdot \frac{(d_\delta - d_0)}{\ln\left(\frac{d_\delta}{d_0}\right)} = \frac{A_\delta - A_0}{\ln\left(\frac{A_\delta}{A_0}\right)} \quad (21.17)$$

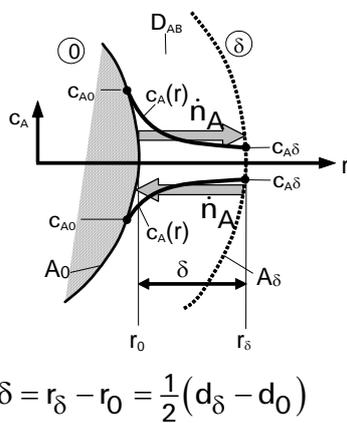
logarithmisches Mittel

→ Näherung für kanalartige Gebilde bei  $\frac{A_\delta}{A_0} < 3$

Flüssigkeitsfilm an Kugelwand:

(Flüssigkeit an Hohlkugel o. ä.)

$$\text{grad } c_A = \frac{dc_A}{dr} \quad (21.19)$$



Konzentrationsverlauf (hyperbolisch)

$$c_A(r) = c_{A0} - (c_{A0} - c_{A\delta}) \cdot \frac{\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}\right)}{\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_\delta}\right)} \quad (21.20)$$

$$A_m^{Kug} = \pi \frac{(d_\delta - d_0)}{\left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_\delta}\right)} = \sqrt{A_\delta \cdot A_0} \quad (21.21)$$

geometrisches Mittel

→ Näherung für geschlossene Gefäße bei  $\frac{A_\delta}{A_0} < 3$

Sonderfall: Wasserdampfdiffusion durch ruhende Luftschicht

$$\dot{m}_W = \frac{D_{WL} \cdot p^* \cdot A_m}{R_W \cdot T_m \cdot \delta} \cdot \ln\left(\frac{p^* - p_{D\delta}}{p^* - p_{D0}}\right) \quad (21.23) \rightarrow \text{STEFANsches Gesetz}$$

W...Wasser, L...Luft

$D_{WL}, R_W$  ↗ Stoffwerte

$p^*$  - Gesamtdruck

$A_m$  - mittlere vom Wasserdampf durchdrungene Fläche

$T_m$  - mittlere Temperatur der Luftschicht

$\delta$  - Dicke der Luftschicht

$p_{D0}, p_{D\delta}$  - Partialdrücke des Wasserdampfes bei 0 und  $\delta$  mit

$$p_{D0} = p_{Ds}(\vartheta_0) \quad \text{mit } \vartheta_0 \dots \text{Temperatur an Flüssigkeitsoberfläche}$$

$$p_{D\delta} = \varphi_\delta \cdot p_{Ds}(\vartheta_\delta) \quad \text{mit } \vartheta_\delta, \varphi_\delta \dots \text{Temperatur und relative Feuchte in Luft}$$

Bei  $\vartheta \geq 0,01 \text{ °C}$  ( $0 \text{ °C}$ ) Sättigungsdruck des Wasserdampfes  $p_{Ds}(\vartheta) = p_s(\vartheta)$  ↗ WDT

Bei  $\vartheta < 0,01 \text{ °C}$  ( $0 \text{ °C}$ ) Sublimationsdruck des Wasserdampfes  $p_{Ds}(\vartheta) = p_{\text{subl}}(\vartheta)$  ↗ SW

Näherung: für kleine Partialdrücke des Wasserdampfes

$$\dot{m}_W = \frac{D_{WL} \cdot A_m}{R_W \cdot T_m \cdot \delta} \cdot (p_{D0} - p_{D\delta}) \quad (21.24), \quad \dot{n}_W = \frac{\dot{m}_W}{M_W} \quad (21.25)$$

→ Vereinfachtes STEFANsches Gesetz

Sonderfall: Wasserdampfdiffusion durch Wände

Diffusionsstrom des Wasserdampfes:

$$\dot{m}_W = \frac{\Delta p_D}{R_D^{\Delta p}} \quad (21.26)$$

$$\Delta p_D = p_{Di} - p_{Da} \quad (21.27)$$

Diffusionswiderstand:

$$R_D^{\Delta p} = \sum_j R_{Dj}^{\Delta p} \quad (21.28)$$

Diffusionswiderstand der j-ten Wandschicht:

$$R_{Dj}^{\Delta p} = \frac{\delta_{\mu j}}{\frac{D_{WL}}{R_W \cdot T_{mj}} \cdot A_{mj}} \quad (21.29)$$

Äquivalente Luftschichtdicke (DIN 4108):

$$\delta_{\mu j} = \mu_j \cdot \delta_j \quad (21.30)$$

$\mu$  ↗ Stoffwerte

## Konvektiver Stoffübergang

(analog Berechnung Konvektiver Wärmeübergang)

Stoffstrom  
des Stoffes A:

$$\dot{n}_A = \frac{\Delta c_{AB}}{R_{\beta_{AB}}} \quad (22.1)$$

$$\Delta c_{AB} = |c_{AF} - c_{A0}| \quad (22.2)$$

$c_{AF}$  - Konzentration von A im Fluid

$c_{A0}$  - Konzentration von A an der  
Oberfläche

Stoff  
übergangs-  
widerstand:

$$R_{\beta_{AB}} = \frac{1}{\beta_{AB} \cdot A} \quad (22.3)$$

$\beta_{AB}$  - Stoffübergangskoeffizient von Stoff A  
in Stoff B

A - durchdiffundierte Fläche



$$\dot{n}_A = \Delta c_{AB} \cdot \beta_{AB} \cdot A \quad (22.4)$$

## Stoffübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion

$$\beta_{AB} = Sh_{AB} \cdot \frac{D_{AB}}{l_{char}} \quad (22.5)$$

$Sh_{AB}$  - *Sherwood-Zahl*

$D_{AB}$  - ↗ Stoffwerte

$l_{char}$  - charakteristische Länge

AB .... Stoff A in Richtung Stoff B

*Reynolds-Zahl*  
(des Fluids):

$$Re_F = \frac{c_F \cdot l_{char}}{\nu_F} \quad (22.6)$$

$c_F$  - Geschwindigkeit des Fluids

$\nu_F$  - kinematische Viskosität des Fluids

↗ Stoffwerte bei  $T_F$

*Schmidt-Zahl*:

$$Sc_{AB} = \frac{\nu_F}{D_{AB}} \quad (22.7)$$

Berechnung der *Sherwood-Zahl*  $Sh_{AB} = f(Re_F, Sc_{AB})$  mit Nu-Gleichungen, aber es gilt:

$$\begin{array}{l} \text{statt Pr} \rightarrow Sc_{AB} \\ \text{statt Re} \rightarrow Re_F \\ \text{statt Nu} \rightarrow Sh_{AB} \end{array} \quad (22.8)$$

↗ Formelsammlung

Technische Thermodynamik und  
Wärmeübertragung

Näherung: falls Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  bekannt

$$\beta_{AB} = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \quad (22.9)$$

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient

$\rho$  - Dichte bei  $T_0$

$c_p$  - spezifische isobare Wärmekapazität  
bei  $T_0$

## Stoffübergangskoeffizient bei freier Konvektion

(nicht über *Sherwood*-Zahl berechnen!)

$$\dot{n}_A = \beta_{AB} \cdot A \cdot |c_{AF} - c_{A0}| \quad (22.10)$$

$c_{AF}$  - Konzentration von A im Fluid  
 $c_{A0}$  - Konzentration von A an der Oberfläche  
 $\beta_{AB}$  - Stoffübergangskoeffizient von Stoff A in Stoff B  
A - durchdiffundierte Fläche  
 $D_{AB}$  - ↗ Stoffwerte  
 $\delta$  - Schichtdicke

$$\beta_{AB} = \frac{D_{AB}}{\delta} \quad (22.11)$$

Sonderfall: Luftschicht über Wasseroberfläche:

$$\beta_{WL} = 1,91 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (22.12)$$

### Verdunstungsgesetz nach *Dalton*:

$$\dot{m}_W = \frac{\beta_{WL} \cdot A}{R_W \cdot T_m} \cdot |p_{D0} - p_{DG}| \quad (22.13)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \cdot (T_0 + T_G) \quad (22.14)$$

$\beta_{WL}$  - Stoffübergangskoeffizient von Wasserdampf in Luft  
A - durchdiffundierte Fläche  
 $R_W$  - ↗ Stoffwerte  
 $p_{D0} = p_{Ds}(\vartheta_0)$   
 $p_{DG} = \varphi_G \cdot p_{Ds}(\vartheta_G)$   
 $p_{Ds}(\vartheta) = p_s(\vartheta)$  ↗ WDT, Stoffwerte

Näherung: falls Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  bekannt

$$\beta_{WL} = \frac{\alpha}{\rho_{G0} \cdot c_{pG0}} \quad (22.15)$$

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient  
 $\rho_{G0}, c_{pG0}$  bei  $T_0$ , falls nicht gegeben

Weitere Näherung: Festwert für Luft-Wasser verwenden:  $\beta_{WL} = 1,91 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

### Verdunstungsgesetz nach *Lewis*:

$$\dot{m}_W = \sigma_{WL} \cdot A \cdot |x_{W0} - x_{WG}| \quad (22.16) \quad x_{W0}, x_{WG} - \text{Absolute Feuchte}$$

Verdunstungskoeffizient:  $\sigma_{WL} = \rho_{G0} \cdot \beta_{WL} \quad (22.17)$

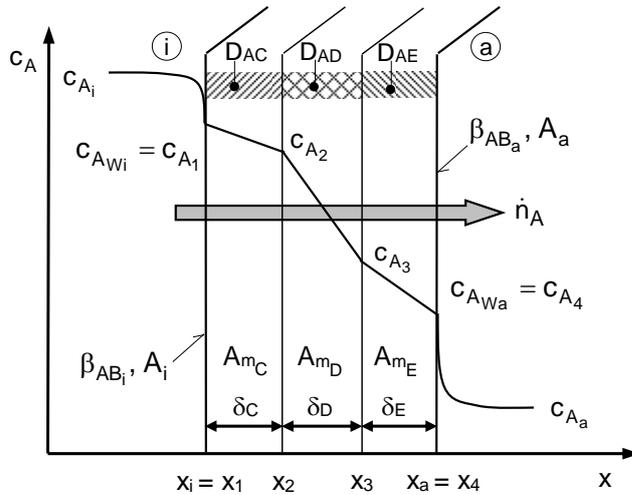
Näherung: falls Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  bekannt

$$\sigma_{WL} = \rho_{G0} \cdot \beta_{WL} = \frac{\alpha}{c_{pG0}} \quad (22.18)$$

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient  
 $\rho_{G0}, c_{pG0}$  bei  $T_0$ , falls nicht gegeben

# Eindimensionaler stationärer Stoffdurchgang

$(D_{AB}, \beta_{AB} = \text{const})$



Sonderfall:

Ebene Wände

$$A_i = A_{m_j} = A_a = A = \text{const}$$

(j = C, D, E)

Stoffstrom  
des Stoffes A:

$$\dot{n}_A = \frac{\Delta c_A}{R_{\beta D A}} \quad (23.1)$$

$$\Delta c_A = |c_{A_i} - c_{A_a}| \quad (23.2)$$

$c_{A_i}$  - Konzentration von A in B innen

$c_{A_a}$  - Konzentration von A in B außen

Stoffdurchgangswiderstand

$$R_{\beta D A} = R_{\beta A B_i} + \sum_j R_{D A_j} + R_{\beta A B_a} \quad (j = C, D, E) \quad (23.3)$$

Stoffübergangswiderstände

$$R_{\beta A B_i} = \frac{1}{\beta_{A B_i} \cdot A_i} \quad (23.4)$$

$\beta_{A B}$  - Stoffübergangskoeffizient von Stoff A in Stoff B

$$R_{\beta A B_a} = \frac{1}{\beta_{A B_a} \cdot A_a} \quad (23.5)$$

Diffusionswiderstand  
der Schicht j (j = C, D, E)

$$R_{D A_j} = \frac{\delta_j}{D_{A_j} \cdot A_{m_j}} \quad (23.6)$$

$D_{A_j}$  - Diffusionskoeffizient von Stoff A im Stoff j