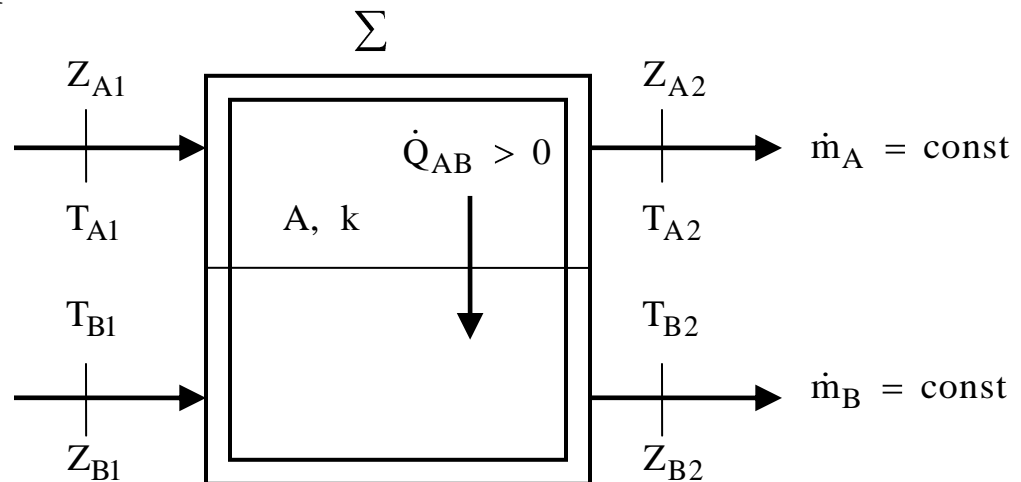


K Wärmeübertrager / Wärmetauscher

1. Hauptsätze der Thermodynamik (Realisierungskriterien)
2. Übertragener Wärmestrom (Mittlere Temperaturdifferenz)
3. Beispiele

Technische Beispiele für Wärmeübertrager, Rekuperatoren, Verdampfer, Kondensatoren werden in der VL "Wärmetauscher" (2 SWS) jeweils im SS besprochen. Literatur: R. Gregorig, Sauerländer, Aarau, „Wärmeaustausch und Wärmetauscher“, 1973

Prinzipskizze



Voraussetzungen:

1. Stationarität.
2. Isolierung, Keine Wärmeverluste an Umgebung.
3. Drücke in Massenströmen konstant
4. WT – Flächen fest, k – Wert konstant.

Zustände

$$Z_{Ai} : T_{Ai}, p_A = \text{const}, h_{Ai}, S_{Ai}$$

$$Z_{Bi} : T_{Bi}, p_B = \text{const}, h_{Bi}, S_{Bi} \quad i = 1,2$$

1.HS Energiesatz

$$\text{Allg. Form:} \quad \sum \dots \dot{U} = \sum_{\alpha} h_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} = 0 \dots \quad \text{V1} \quad (1)$$

$$\rightarrow \quad h_{A1} \dot{m}_A + h_{B1} \dot{m}_B - h_{A2} \dot{m}_A + h_{B2} \dot{m}_B = 0 \quad (1A)$$

$$\rightarrow \quad h_{A1} - h_{A2} \dot{m}_A + h_{B1} - h_{B2} \dot{m}_B = 0$$

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = - \frac{h_{B2} - h_{B1}}{h_{A2} - h_{A1}} \geq 0 \quad (1B)$$

“Einfache Fluide (V,L)”

$$\text{CEOS :} \quad h_{A2} - h_{A1} = c_{pA} T_{A2} - T_{A1}, \quad c_{pA} = \text{const} \quad (2A)$$

$$h_{B2} - h_{B1} = c_{pB} T_{B2} - T_{B1}, \quad c_{pB} = \text{const} \quad (2B)$$

$$1B, 2A, B \quad \frac{\dot{W}_A}{\dot{W}_B} = \frac{c_{pA} \dot{m}_A}{c_{pB} \dot{m}_B} = - \frac{T_{B2} - T_{B1}}{T_{A2} - T_{A1}} > 0 \quad (3)$$

$$\dot{W}_A = c_{pA} \dot{m}_A$$

$$\dot{W}_B = c_{pB} \dot{m}_B$$

Definition der Wärmekapazitätsströme der Wärmeträger/Thermofluide.

$$(3) \rightarrow \frac{T_{B1} - T_{B2}}{T_{A2} - T_{A1}} \geq 0 \quad \dots \quad 1, \text{HS}$$

$$V : T_{B1} > \text{oder} < T_{B2} \quad 3A \Rightarrow T_{A2} > \text{oder} < T_{A1}$$

(3A): Invarianz gegenüber Vertauschung (A ↔ B) !

2.HS Entropiesatz

$$\Sigma \dots \dot{S} = \sum_{\alpha} s_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} + P_s = 0 \quad \dots \quad V1 \quad (4)$$

≥ 0

$$\text{Allg. Form:} \quad \rightarrow \quad P_s = - \sum_{\alpha} s_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} \geq 0 \quad (4A)$$

$$P_s = \underbrace{s_{A2} - s_{A1} \dot{m}_A + s_{B2} - s_{B1} \dot{m}_B}_{\text{Entropieproduktion bei Warmeaustausch}} \geq 0$$

Exergieverluste (vgl. TT1, VL – Manuskript)

$$P_{\text{Ex}} = -T^* P_s$$

$$P_{\text{Ex}} = -T^* (s_{A2} - s_{A1} \dot{m}_A + s_{B2} - s_{B1} \dot{m}_B) \leq 0 \quad (5)$$

Ideale Fluide, $p = \text{const}$, vgl. Entropie idealer Gase TT1

$$p_A = \text{const} : \quad s_{A2} - s_{A1} = c_{pA} \ln \left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}} \right) \quad (6A)$$

$$p_B = \text{const} : \quad s_{B2} - s_{B1} = c_{pB} \ln \left(\frac{T_{B2}}{T_{B1}} \right) \quad (6B)$$

$$4A,6A,B \quad P_s = \dot{W}_A \ln\left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}}\right) + \dot{W}_B \ln\left(\frac{T_{B2}}{T_{B1}}\right) \geq 0 \quad (7)$$

$$\dot{W}_A = c_{pA} \dot{m}_A \geq 0$$

$$\dot{W}_B = c_{pB} \dot{m}_B \geq 0$$

$$(3,7) \quad -\frac{T_{B2} - T_{B1}}{T_{A2} - T_{A1}} \ln\left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}}\right) + \ln\left(\frac{T_{B2}}{T_{B1}}\right) \geq 0 \quad (8)$$

$$V : \quad \dot{m}_A \cdots \text{Kühlung} : \quad T_{A2} > T_{A1} \quad (9)$$

$$(3A) \rightarrow \dot{m}_B \cdots \text{Erwärmung} : \quad T_{B2} > T_{B1}$$

$$(8,9) \rightarrow 0 \leq \frac{T_{B2} - T_{B1}}{\ln\left(\frac{T_{B2}}{T_{B1}}\right)} \geq \frac{T_{A2} - T_{A1}}{\ln\left(\frac{T_{A1}}{T_{A2}}\right)} \quad (10)$$

Realisierungskriterium für WT bei

vorgeg. $T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}$

Bei Gleichheitszeichen in (10) strebt $k_A \rightarrow \infty$

und $P_s \rightarrow 0$ (Reversibler Wärmetausch)

2. Übertragener Wärmestrom

Darstellung durch „mittlere Temperaturdifferenz“
Und Fourier – Gesetz:

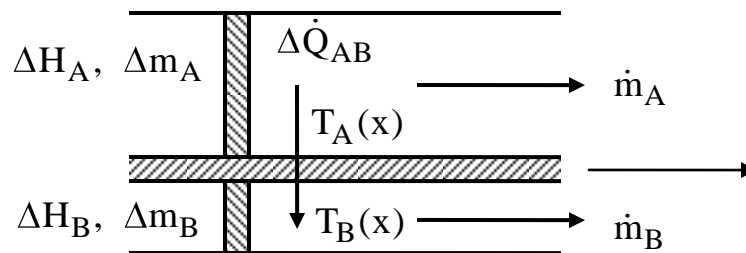
$$\text{Ansatz: } \dot{Q}_{AB} = kA \cdot \Delta T_m \quad \dots \text{ von A nach B} \quad (11)$$

k ... WÜ – Koeffizient der WT – Flächen

A ... WT – Flächen

$\Delta T_m = ? \dots$ Abhängigkeit von $T_{A1} \dots T_{B2}$?

2a) Energiebilanz von Massenelementen der Wärmefluide :



$$dt : \quad d\Delta H_A = -\Delta \dot{Q}_{AB} \cdot dt \quad \dots \text{ Wärmeabgabe} \quad (12A)$$

$$d\Delta H_B = \Delta \dot{Q}_{AB} \cdot dt \quad \dots \text{ Wärmeabgabe} \quad (12B)$$

$$\text{Fourier : } \Delta \dot{Q}_{AB} = k\Delta A (T_A(x) - T_B(x)) \quad (13)$$

$$\Delta A = L\Delta x \quad (14)$$

L ... charakt. Breite der WT – Fläche A

$$(2,12,13) \quad c_A \Delta m_A dT_A = -k \Delta A (T_A - T_B) dx \quad (15A)$$

$$c_B \Delta m_B dT_B = -k \Delta A (T_A - T_B) dx \quad (15B)$$

$$(15A - 15B) \quad d(T_A - T_B) = -k \Delta A \left(\frac{1}{c_A \Delta m_A} + \frac{1}{c_B \Delta m_B} \right) (T_A - T_B) dx$$

$$\int_1^2 \frac{d(T_A - T_B)}{T_A - T_B} = -kL \left(\frac{1}{c_A \dot{m}_A} + \frac{1}{c_B \dot{m}_B} \right) \int_0^L dx$$

$$\ln \left(\frac{T_A - T_B|_2}{T_A - T_B|_1} \right) = -kA \left(\frac{1}{c_A \dot{m}_A} + \frac{1}{c_B \dot{m}_B} \right) (T_A - T_B) \quad (16)$$

2b) Energiebilanzen der Massen, die pro Zeiteinheit im Wärmeübertrager ein- bzw. austreten \dot{m}_A, \dot{m}_B :

$$c_{pA} \dot{m}_A (T_{A2} - T_{A1}) = -\dot{Q}_{AB} \quad (17A)$$

$$c_{pB} \dot{m}_B (T_{B2} - T_{B1}) = \dot{Q}_{AB} \quad (17B)$$

$$\frac{1}{c_{pA} \dot{m}_A} = -\frac{T_{A2} - T_{A1}}{\dot{Q}_{AB}} \quad (18A)$$

$$\frac{1}{c_{pB} \dot{m}_B} = \frac{T_{B2} - T_{B1}}{\dot{Q}_{AB}} \quad (18B)$$

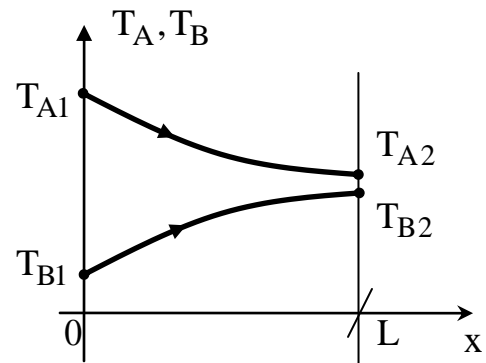
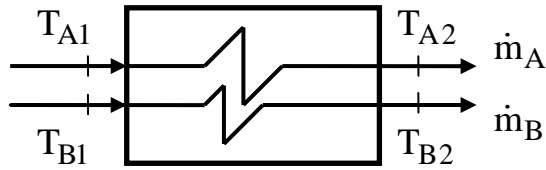
$$(16,18): \quad \underline{\dot{Q}_{AB} = kA\Delta T_m} \quad (11)$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{A2} - T_{B2} - T_{A1} - T_{B1}}{\ln\left(\frac{T_{A2} - T_{B2}}{T_{A1} - T_{B1}}\right)} \quad (19)$$

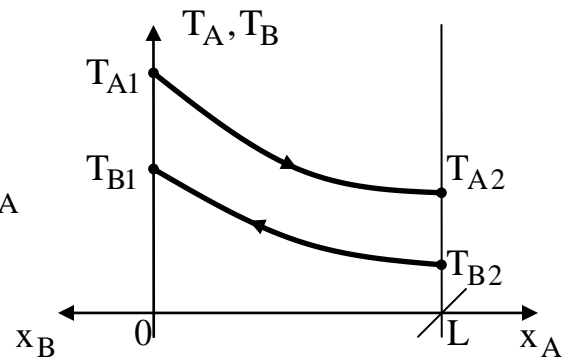
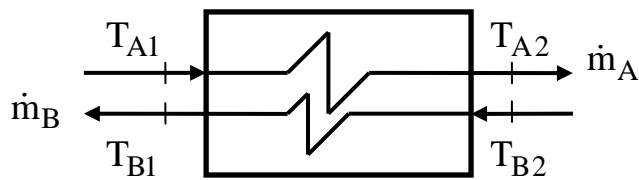
„Logarithmische Mitteltemperaturdifferenz“

Gilt für Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertrager,
aber nicht für Kreuzstrom-Anlagen! Vgl. Figuren und
Zustandsänderungen der Fluide (A,B)!

Gleichstrom – WÜ

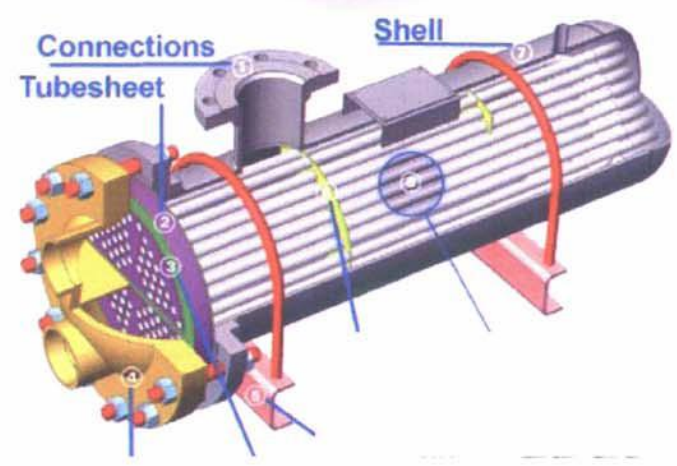
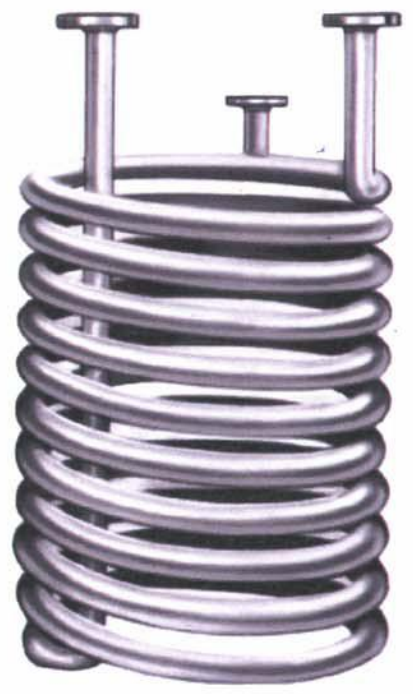
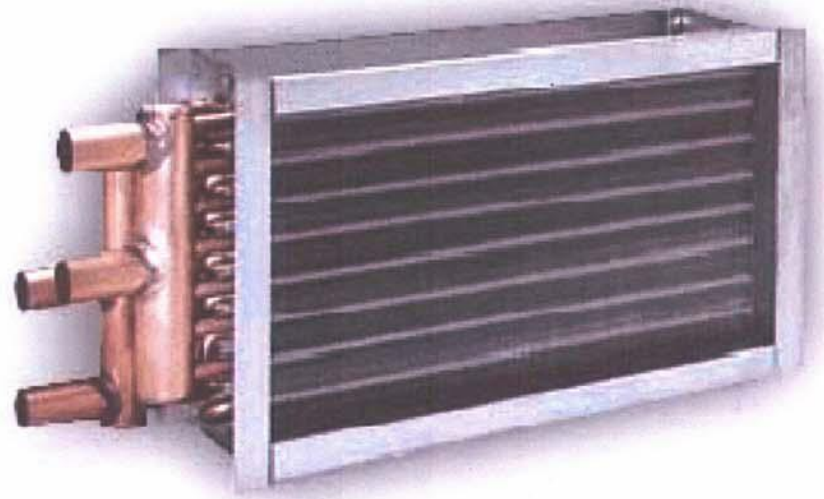
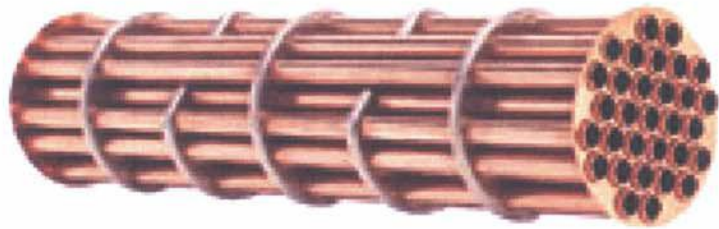


Gegenstrom – WÜ *

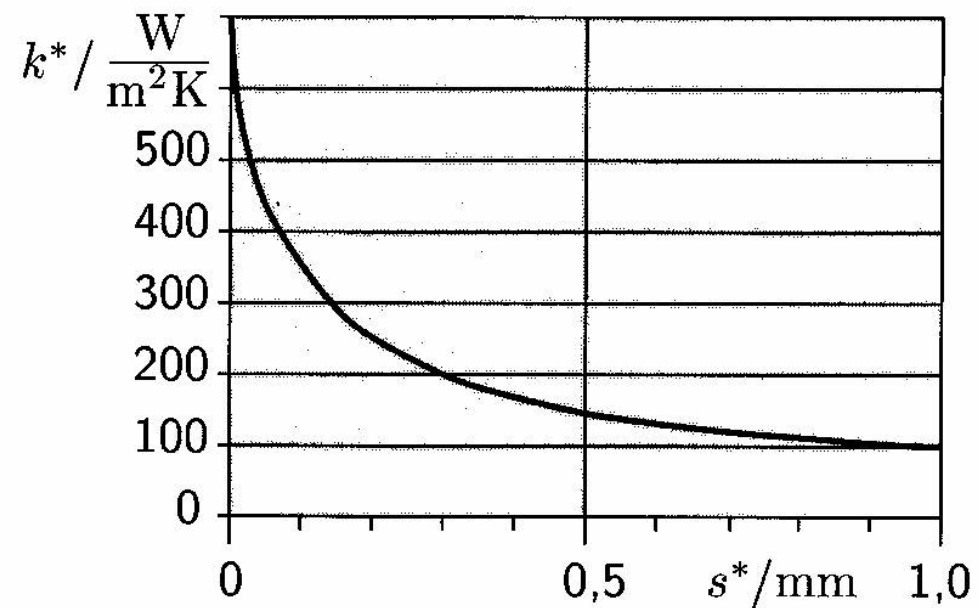
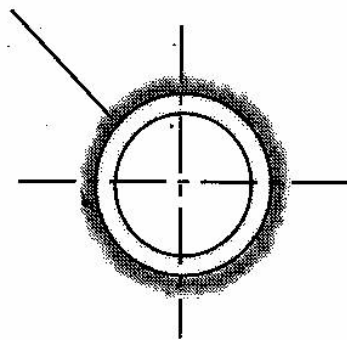


- *) In der Regel geringere Exergieverluste, da mittlere Temperaturdifferenz kleiner als bei Gleichstrom – WÜ.

FLUID-PAARUNG	$k^*/(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$
Wasser gegen Luft (mit Berippung)	25 – 50
Wasser gegen Öl	110 – 350
Wasser gegen Alkohol (Kondensation)	250 – 700
Wasser gegen Ammoniak (Kondensation)	800 – 1 400
Wasser gegen Wasser	850 – 1 700
Wasser gegen Wasserdampf (Kondensation)	1 000 – 6 000
Zahlenwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten k^* Daten aus: Incropera, DeWitt (1996)	



Schmutzschicht
der Dicke s^*



Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten k^* von der Schmutzschichtdicke s^* (Rohrbündelwärmeübertrager)