

2 Energie

2.1 Energieformen

○ Energie und Arbeit

Energie ist die **Fähigkeit** eines Stoffes, **Arbeit zu verrichten**.

Die Stoffumwandlungsprozesse der Verfahrenstechnik bedingen auch immer Energieänderungen der beteiligten Stoffe. Der Energiegehalt von Stoffen wird verändert, indem man entweder Energie in die Stoffe einträgt oder diesen welche entnimmt. Hierzu muß von außen Arbeit durchgeführt werden oder die Stoffe verrichten Arbeit.

Die wichtigsten Formen von Arbeit und Energie, die in ein Stoffsystem eingetragen werden oder bei Stoffumwandlungsprozessen vorkommen, sind in Abb.2.1.1 zusammengefaßt. Die Aufführung ist nicht vollständig, auf Begriffe wie beispielsweise Spannungsenergie bei elastischen Körpern oder Grenzflächenspannung von Flüssigkeiten wird bei Bedarf später eingegangen.

$W_m = F \cdot l$ <i>Gl.(2.1.1)</i>	W_m : Mechanische Arbeit [Nm] = [J] F: Kraft [N] l: Weg [m]	Kraft die über eine gewisse Strecke wirkt <u>Beispiel:</u> Ein Rührer bringt in ein Stoffgemenge mech. Energie ein
$W_e = U \cdot I \cdot t$ <i>Gl.(2.1.2)</i>	W_e : Elektrische Arbeit [Ws] = [J] U: Spannung [V] I: Stromstärke [A] t: Zeit [s]	Bei einer Spannung verbrauchte Stromstärke über einen Zeitraum <u>Beispiel:</u> Ein elektrischen Antrieb nimmt elektrische Energie auf
$W_i = \frac{\mu}{2} \cdot H^2 \cdot V$ <i>Gl.(2.1.3)</i>	W_i : Magnetische Arbeit (einer Ringspule) [J] μ : Permeabilität [H/m] (H: Henry) H: Magnetische Feldstärke [A/m] V: Volumen [m ³]	Energie zum Aufbau eines magnetischen Feldes in einem bestimmten Volumen <u>Beispiel:</u> In einem Induktionsofen wird durch ein Magnetfeld etwas erwärmt
$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ <i>Gl.(2.1.4)</i>	E_{kin} : Kinetische Energie (Mech. E.) (Bewegungsenergie) [J] m: Masse [g] v: Geschwindigkeit [m/s]	Energie um eine Masse auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu bringen <u>Beispiel:</u> Der Gasstrom der in einer Turbine beschleunigt wurde strömt mit hoher Energie aus der Turbine
$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ <i>Gl.(2.1.5)</i>	E_{pot} : Potentielle Energie (Mech. E.) (Lageenergie) [J] g: Erdbeschleunigung $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ m: Masse [g] h: Höhe [m]	Energie um den Abstand einer Masse zum Erdmittelpunkt zu vergrößern <u>Beispiel:</u> Von einer Pumpe hochgeführte Flüssigkeit hat eine hohe Energie
$Q = m \cdot c \cdot (T - T_0)$ <i>Gl.(2.1.6)</i>	Q: Wärmeenergie = Thermische Energie [J] m: Masse [kg] c: Spezifische Wärmekapazität [J/kgK] T: Endtemperatur [K] T ₀ : Ausgangstemperatur [K]	Erforderliche Energie um eine Masse zu erwärmen <u>Beispiel:</u> Erwärmen eines Stoffes in einem Verdampfer
$Q_{sm} = m \cdot q$ <i>Gl.(2.1.7)</i>	Q_{sm} : Schmelzwärme (Therm. En.) [kJ] m: Masse [kg] q: Spezifische Schmelzwärme [kJ/kg]	Umwandlungenergie für den Phasenübergang fest \longleftrightarrow flüssig <u>Beispiel:</u> Schmelzen von Eis bei 0°C
$Q_{sd} = m \cdot r$ <i>Gl.(2.1.8)</i>	Q_{sd} : Verdampfungswärme (Th. E.) = Kondensationswärme [kJ] m: Masse [kg] r: Spezif. Verdampfungswärme [kJ/kg]	Umwandlungenergie für den Phasenübergang flüssig \longleftrightarrow gasförmig <u>Beispiel:</u> Verdampfen von Wasser bei 100°C

ΔH_f°	Bildungsenthalpie (Chemische Energie) eines Stoffes [J] - bei Elementen: $\Delta H_f^\circ = 0$ bei 0°C - bei Verbindungen wird ΔH_f° aus Tabellenwerken ermittelt	Erforderliche Energie um bei Standardbedingungen (0°C , 1 bar) einen Stoff zu bilden <u>Beispiel:</u> Die Bildungsenergie eines Produktes errechnet sich aus der Summe der Bildungsenergien aller Ausgangsstoffe und anderer zugeführten Energien
ΔH_R°	Reaktionsenthalpie (Chem. E.) [J]	Reaktionsenthalpie die bei einer chem. Reaktion aufgenommen oder abgegeben wird <u>Beispiel:</u> Bei einer Verbrennung in Form von Wärme freierwerdende

Abb.2.1.1: Energie- und Arbeitsformen

□ Aufgabe:

In einem Elektrizitätswerk wird Kohle verbrannt. Mit der entstehenden Hitze wird Wasserdampf erzeugt, der eine Turbine antreibt, die wiederum einen Dynamo antreibt. Welche Formen von Energie treten bei diesen Vorgängen auf?

■ Lösung:**○ Energieformen in der Verfahrenstechnik**

In der verfahrenstechnischen Industrie werden sehr große Mengen an Energie zur Umwandlung der Stoffe gebraucht. Diese werden in Form von **elektrischer** und **mechanischer Energie** sowie als **Wärmeenergie** verwendet.

Die ursprüngliche, noch allgemein gültige Unterteilung der Verfahrenstechnik in **Mechanische**, **Thermische** und **Chemische Verfahrenstechnik** berücksichtigt die Form von Energie, die bei den Prozessen dieser Kategorie eingeleitet wird.

- In der **Mechanischen Verfahrenstechnik** wird vorwiegend mechanische Energie eingesetzt. Zum **Trennen**, **Mischen**, **Zerkleinern** oder **Stückigmachen** von Stoffen werden entweder bewegte Apparateile eingesetzt oder die Bewegungsenergie der Stoffteilchen wird ausgenutzt. Daneben gibt es noch elektrische Trennverfahren, die man ebenfalls der Mechanischen Verfahrenstechnik zuordnet.

Der Antrieb der Apparate und Maschinen erfolgt entweder durch Verbrennen von Rohstoffen oder mittels anderer Energieformen wie unter anderem elektrischem Strom, so daß auch die elektrische Energie eine Rolle spielt.

- In der **Thermischen Verfahrenstechnik** erfolgt sowohl die **Trennung** als auch die **Vereinigung** von Stoffen durch Wärme d.h. thermische Energie. Diese wird durch Energieträger geliefert oder direkt in den Apparaten erzeugt. Auch hier bedarf es elektrischer Energie, die direkt in Wärme umgewandelt wird oder zum Herstellen und Bewegen von andern Energieformen erforderlich ist.

- Die **Chemische Verfahrenstechnik** befaßt sich mit **chemischen Reaktionen**, bei denen Wärmeenergie als Prozesswärme entweder gebraucht oder abgegeben wird. Hier spielt die elektrische Energie die gleiche Rolle wie in der Thermischen Verfahrenstechnik.

2.2 Energieerhaltungssatz

○ Energieerhaltungssatz oder 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

Innerhalb eines abgeschlossenen Systems bleibt die Summe aller Energien gleich. Unter einem abgeschlossenen System versteht man ein System, dem keine Stoffe und keine Energie (weder in Form von Arbeit, noch Wärme, noch sonstige) zugeführt oder entnommen werden.

Innerhalb des abgeschlossenen Systems kann **keine Energie entstehen**. Die Energie kann allerdings in verschiedenen Formen **umgewandelt** werden. Die Energie kann auch **nicht vernichtet** werden, sie kann nur in **nicht brauchbare Formen** umgewandelt werden.

-

□ Beispiel:

In einem Kraftwerk wird aus Erdöl Strom erzeugt. Man spricht von 40% Wirkungsgrad. Welche Energien wurden ineinander umgewandelt? Wo sind die 60% geblieben?

■ Lösung:

2.3 Energieversorgung

○ Energieträger

Als **Energieträger** bezeichnet man alle Stoffe, die direkt oder indirekt die Versorgung mit Energie gewährleisten:

- In der Natur vorhandene, kaum verwendete Energieträger:
Sonnenstrahlen, der Ursprung aller Energieformen,
Wind
- Natürlich vorhandene, häufig verwendete Energieträger:
Kohle, Erdöl, Erdgas, Holz
Wasser (Gefälle in Flüssen, Gezeiten der Meere)
- Künstlich hergestellte Energieträger:
Uran, Plutonium
- In der Technik häufig verwendete Energieträger
Elektrischer Strom, Druckluft, Heißdampf

○ Umwandlung von Energien

Der Verbrauch an Energie in der Industrie ist ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Herstellung von Produkten, so daß hier ebenso wie in privaten Haushalten versucht wird, möglichst wenig Energie zu verbrauchen. Da jede Umwandlung einer Energieform in eine andere Verluste in Form von Wärme mit sich bringt, wird durch eine entsprechende Planung der Produktionsanlagen versucht, diese Umwandlungen auf das Nötigste zu beschränken und die zwangsläufig anfallende Wärme noch zu nutzen.

Durch **Verbrennen** der **fossilen Brennstoffe** Kohle, Erdöl und Erdgas wird der größte Teil des Energiebedarfs gedeckt. Die dabei entstehende **Wärme** kann direkt einem Stoff zugeführt oder von einem Energieträger aufgenommen werden. Ansonsten wird sie in einem Motor in **Bewegungsenergie** zum Antrieb von Maschinen verwendet werden.

Die **Gewinnung von elektrischem Strom** kann in einem Kraftwerk über diesen Weg erfolgen, indem mit Wärme Wasserdampf erzeugt wird, der wiederum an einer Turbine entspannt wird, die einen Gleichstrom-Generator (Dynamo) antreibt, der Strom liefert.

Thermische Energie oder **Wärme** stellt den größten Anteil der gebrauchten Energie dar. Sie tritt sowohl beim Heizen als auch beim Kühlen auf:

Heizen:

Häufig ist es in der Verfahrenstechnik erforderlich, den Inhalt von Apparaten und Behältern zu erwärmen. Hierzu wird meistens als Energieträger **Wasserdampf** verwendet. Das Wasser wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt d.h. es wird verdampft, gibt seine Wärme ab und der dabei kondensierende Dampf wird erneut erhitzt.

Kühlen:

Als Kühlmittel werden häufig Luft und Wasser verwendet.

- **Luft** liegt kostenlos in großen Mengen vor, sie nimmt allerdings wenig Wärme auf, die meist an die Atmosphäre verloren geht. Die Luft wird im offenen Kreislauf geführt d.h. es wird Luft aus der Umgebung angesaugt und anschließend in selbige zurück geführt.

- **Wasser** hat die größte Wärmeaufnahme, muß allerdings aufwendig aufbereitet (gereinigt) werden und erhöht die Korrosionsgefahr der Anlage. Wasser wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt.

- Andere **Kältemittel** sind hauptsächlich **Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe** (FCKW) (z.B. Frigen oder Freon) und **Ammoniak**. Diese nehmen bereits bei niedrigen Temperaturen Wärme auf uns es besteht keine Korrosionsgefahr. Manche Verbindungen zerstören jedoch die Ozonschicht der Atmosphäre, wenn sie freigesetzt werden.

2.4 Wärmeübertragung**2.4.1 Erwärmen von Stoffen****○ Wärmestrom**

Die pro Zeiteinheit transportierte Wärmemenge bezeichnet man als Wärmestrom.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (Gl.2.4.1.1) \quad \begin{array}{l} \dot{Q}: \text{Wärmestrom [W]} \\ Q: \text{Wärmeenergie [J]} \\ t: \text{Zeit [s]} \end{array}$$

○ Wärmeenergie

Die erforderliche **thermische Energie** d.h. **Wärme**, um die Masse m eines Stoffes mit der spezifischen Wärmekapazität c von einer Temperatur T_0 auf eine Temperatur T zu erwärmen (oder abzukühlen), errechnet sich nach Gl.2.1.6 zu

$$Q = m \cdot c \cdot (T - T_0)$$

Der Wärmestrom errechnet sich unter Berücksichtigung von Gl.2.1.6 und 2.4.1.1:

$$\dot{Q} = m \cdot c \cdot (T - T_0) / t$$

$$\frac{Q}{t} = \frac{m \cdot c \cdot (T - T_0)}{t}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T - T_0) \quad (Gl.2.4.2.1) \quad \begin{array}{l} \dot{Q}: \text{Wärmestrom [W]} \\ \dot{m}: \text{Massenstrom [kg/s]} \\ c: \text{Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]} \\ T: \text{Endtemperatur [K]} \\ T_0: \text{Ausgangstemperatur [K]} \end{array}$$

Gleichungen 2.1.6 und 2.4.2.1 gelten nur, solange keine Aggregatzustandsänderung des Stoffes vorliegt. Bei Änderung des Aggregatzustandes müssen zusätzlich Schmelzwärme Q_{sm} bzw. Verdampfungswärme Q_{sd} berücksichtigt werden.

Die **Schmelzwärme** Q_{sm} ist die erforderliche Wärme, um die Masse m eines Stoffes mit spezifischer Schmelzwärme q vom festen Aggregatzustand in den flüssigen Aggregatzustand zu bringen. Die **Temperatur** des Stoffes **verändert** sich dabei **nicht!** Entsprechend Gl.2.1.7 gilt:

$$Q_{sm} = m \cdot q$$

Analog hierzu ist die **Verdampfungswärme** Q_{sd} die erforderliche Wärme, um die Masse m eines Stoffes mit spezifischer Verdampfungswärme r vom flüssigen Aggregatzustand in den gasförmigen Aggregatzustand zu bringen. Auch hier verändert die Temperatur des Stoffes sich nicht! Nach Gl.2.1.8 gilt:

$$Q_{sd} = m \cdot r$$

Umgekehrt wird beim **Abkühlen** eines Gases die **Kondensationswärme** Q_{sd} frei, wenn die Masse m flüssig wird.

Die spezifischen Werte für Schmelzwärme und Verdampfungs- gleich Kondensationswärme findet man als Stoffdaten in Tabellenwerken.

Die Veränderung der Temperatur eines Stoffes in Abhängigkeit des Aggregatzustandes und der zugeführten Wärme wird in Abb.2.4.1.1 verdeutlicht.

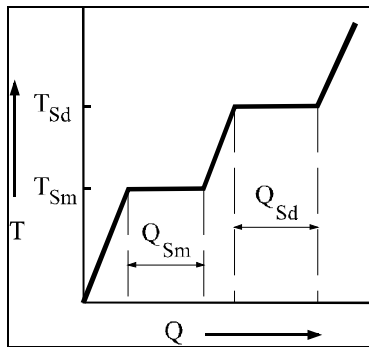


Abb.2.4.1.1: Temperaturverlauf über zugeführter Wärme

□ Aufgabe:

Man erwärmt 200g Eis (Temperatur -5°C) mit 100 kJ. Welche Temperatur hat das sich bildende Wasser?
 Spezifische Wärmen: $c(\text{Eis}) = 2.1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$; $c(\text{Wasser}) = 4.182 \text{ kJ}/(\text{kgK})$.
 Spezifische Schmelzwärme: $q = 334 \text{ kJ}/\text{kg}$

■ Lösung:

□ Aufgabe:

- Welche Wärmemenge geben 5 kg Wasserdampf von 100°C beim Kondensieren ab?

- Diese Wärme wird 20 kg Eis von 0°C zugeführt. Was entsteht dabei?

Spezifische Kondensationswärme: 2256 kJ/kg

Spezifische Schmelzwärme: 334 kJ/kg

Spezifische Wärme von Wasser: 4.182 kJ/(kgK)

■ **Lösung:**

○ **Mischwasser**

Welche Endtemperatur T erhält man, wenn man zwei Massen m_1 und m_2 an Wasser mit unterschiedlichen Temperaturen T_{01} und T_{02} vermischt?

Das wärmere Wasser, z.B. mit dem Index 1 versehen, gibt Wärme ab, bis sich die Endtemperatur T eingestellt hat. Nach Gl.2.1.6 gilt:

$$Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot (T - T_{01})$$

Analog berechnet sich die dem kälteren Wasser 2 zugeführte Wärme:

$$Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot (T - T_{02})$$

Nach dem Energieerhaltungssatz muß die Gesamtenergie erhalten bleiben:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

Durch Einsetzen der beiden Wärmen erhält man:

$m_1 c_1 (T - T_{01}) + m_2 c_2 (T - T_{02}) = 0$	(Gl.
2.3.1.1)	

Für die Wärmekapazitäten gilt: $c_1 = c_2 = c$

$$m_1 c (T - T_{01}) + m_2 c (T - T_{02}) = 0 \quad / : c$$

$$m_1 (T - T_{01}) + m_2 (T - T_{02}) = 0$$

$$m_1 T - m_1 T_{01} + m_2 T - m_2 T_{02} = 0 \quad / + m_1 T_{01} + m_2 T_{02}$$

$$(m_1 + m_2) T = m_1 T_{01} + m_2 T_{02} \quad / : (m_1 + m_2)$$

$T = \frac{m_1 \cdot T_{01} + m_2 \cdot T_{02}}{m_1 + m_2}$	(Gl.2.3.1.2) Durch Mischen der Massen m_1 und m_2 mit Ausgangs-temperaturen T_{01} und T_{02} erzielte Endtemperatur T
---	--

Bemerkung:

Werden verschiedene Flüssigkeiten (unterschiedliche Wärmekapazitäten c_1 und c_2) gemischt, errechnet sich die Endtemperatur aus Gl.2.3.1.1.

□ **Aufgabe:**

Eine Waschanlage benötigt 1100 l Wasser von 40°C. Es steht kaltes Wasser von 10°C und warmes Wasser von 65°C zur Verfügung. Welche Mengen an kaltem und an warmem Wasser werden benötigt?

■ Lösung:**□ Aufgabe:**

40 kg warmes Wasser von 100°C wurden mit 60 kg kaltem Wasser vermischt, wobei sich eine Endtemperatur von 80°C einstellte. Welche Temperatur hatte das kalte Wasser ?

■ Lösung:

2.4.2 Wärmetransport (Wärmeausbreitung)

Wenn zwei Körper unterschiedliche Temperaturen haben, so findet immer ein Wärmetransport zwischen diesen Körpern statt. Dabei wird Wärme immer von dem Körper höherer Temperatur zu dem Körper mit geringerer Temperatur fließen, bis beide Körper gleiche Temperaturen haben.

Man unterscheidet drei Arten des Energietransportes:

○ Wärmeleitung

Innerhalb eines Körpers sich berührender Körper wird die Wärmeenergie von Stoffteilchen höherer Energie zu Stoffteilchen geringerer Energie weitergegeben. Die Stoffteilchen bewegen sich nicht fort, es findet kein Teilchentransport statt.

□ Beispiel:

○ Wärmestrahlung

Übertragung der Wärme in Form von Wärmestrahlen, die auch durch den leeren Raum erfolgen kann.

□ Beispiel:

○ Wärmeströmung = Konvektion

Übertragung zwischen Körpern durch einen Mittelstoff, der Kontakt mit beiden Körpern hat. Durch den Teilchentransport des Mittelstoffes wird die Wärme transportiert.

- **Freiwillige Konvektion:** Da die Dichte von warmen Flüssigkeiten und Gasen geringer ist als die Dichte der kalten Stoffe, steigen diese nach oben.

□ Beispiel:

- **Erzwungene Konvektion:** Die Strömung einer Flüssigkeit oder eines Gases kann durch äußere Kräfte erzwungen werden

□ Beispiel:

2.4.3 Wärmeleitung

○ Stationäre Wärmeleitung

Eine **stationäre Wärmeleitung** findet statt wenn ein konstanter Temperaturunterschied zwischen zwei Stellen im Wärmeleiter (Abb.2.4.3.1) vorliegt. Die transportierte Wärmemenge errechnet sich wie folgt

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot t \cdot \Delta T}{l} \quad (\text{Gl.2.4.3.1})$$

Q: Transportierte Wärmemenge [J]

λ : Wärmeleitfähigkeit des Materials [W/(mK)]

A: Querschnittsfläche des Wärmeleiters [m²]

t: Dauer der Wärmeleitung [s]

ΔT : Temperaturdifferenz [K]

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

l: Länge des Wärmeleiters [m]

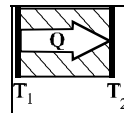


Abb.2.4.3.1:
Wärmeleitung

Die **Wärmeleitfähigkeit λ** ist eine Stoffgröße, die in Tabellenwerken (Auszug in Abb. 2.4.3.2) nachgeschlagen wird

Stoff	λ [W/(mK)] bei 20°C	Stoff	λ [W/(mK)] bei 20°C	Stoff	λ [W/(mK)] bei 20°C
Aluminium (99%)	220	Gußeisen	ca 50	Stahl	45
Asbestplatten	0.7	Holz	0.1 - 0.2	Stahl: V2A	15
Beton	ca 1.0	Luft	0.0026	Styropor	0.036
Eis (0°C)	2.2	Paraffinöl	0.124	Teflon	0.2
Eisen	74	Porzellan	ca 1.0	Wasser	0.598
Glaswolle	0.042	Sand	0.35	Zylinderöl	0.138
Gußeisen	ca 50	(trocken)	ca 0.14		
		Silikonöl			

Abb.2.4.3.2: Wärmeleitfähigkeit

□ Aufgabe: Ein 2 cm dicker zylindrischer Edelstahlbehälter (Höhe und Durchmesser je 2 m) ist mit einer Flüssigkeit von 20°C gefüllt. Die Außenwand wird durch ein Heizmittel permanent auf 80°C gehalten.

- Wieviel Wärme fließt innerhalb von 10 Sekunden durch die Wand?
- Wie hoch wäre diese Wärme für den gleichen Behälter aus Styropor?

■ Lösung:

○ Wärmeübergang

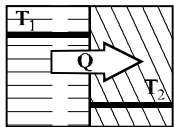


Abb.2.4.3.2: Wärmeduchgang

Zwischen Fluiden (Gasen und Flüssigkeiten) und festen Körpern unterschiedlicher Temperatur, die miteinander in Berührung stehen (Abb.2.4.3.2), findet eine Übertragung von Wärme statt, die man als **Wärmeübergang** bezeichnet. Der Wärmeübergang findet an der Kontaktfläche zwischen den Stoffen statt entsprechend

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad (\text{Gl.2.4.3.2})$$

Q : Durch eine Grenzfläche durchgetretene Wärmemenge [J]
 α : Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 A : Übergangsfläche [m^2]
 t : Dauer der Wärmeleitung [s]
 ΔT : Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen der Stoffe [K]
 $\Delta T = T_2 - T_1$

Der **Wärmeübergangskoeffizient α** hängt vom Fluid, seiner Bewegung und der Oberfläche des festen Körpers ab, nicht von dessen Material. Richtwerte für Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabellenwerken (Auszug in Abb.2.4.3.4) zu finden.

Stoffe	α [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]		α [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
Luft senkrecht zu Metallwand:		Wasser um Rohre:	
- ruhend	3,5 - 35	ruhend	350 - 580
- mäßig bewegt	23 - 70	strömend	$350 + 2100 \sqrt{v} [\text{m}/\text{s}^{-1}]$
- kräftig bewegt	58 - 290	Strömendes Wasser in Rohren	2300 - 4700

Abb.2.4.3.4a: Wärmeübergangskoeffizienten (Richtwerte)

Stoffe	α [W/(m ² K)]		α [W/(m ² K)]
Luft längs ebener Eisenwand:		Siedendes Wasser in Rohren	4700 - 7000
- ($v < 5$ m/s)	$5.8 + 4 \cdot v$ [m/s ⁻¹]	Siedendes Wasser an Metallfläche	3500 - 5800
- ($v > 5$ m/s)	$7.14 \cdot v^{0.78}$ [m/s ⁻¹]	Kondensierter Wasserdampf	11600
Wasser in Kesseln und Behältern	580 - 2300		
Wasser in Kesseln und Behältern mit Rührwerk	2300 - 4700		

Abb.2.4.3.4b: Wärmeübergangskoeffizienten (Richtwerte)

□ Aufgabe: Eine 250°C heiße, quadratische Metallwand (1.2 m Kantenlänge) leitet stündlich 100000 kJ an die Umgebungsluft ab.

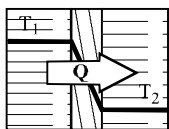
- Ist dies möglich?

- Wie kann der Wärmeübergangskoeffizient verbessert werden?

■ Lösung:

○ Wärmedurchgang

Bei der Übertragung von Wärme von einem Fluid durch eine Trennwand hindurch auf ein anderes Fluid (Abb.2.4.3.3) berechnet sich der Wärmedurchgang nach



$$Q = k \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad (\text{Gl.2.4.3.3})$$

Q: Durch eine Wand übertragene Wärmemenge [J]

k: Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²K)]

A: Übergangsfläche [m²]

t: Dauer der Wärmeleitung [s]

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluiden [K]

Abb.2.4.3.3:

Wärmedurchgang

Die Berechnung des Wärmestromes, d.h. des Wärmedurchgangs pro Zeiteinheit, ergibt:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Gl.2.4.3.4})$$

Der **Wärmedurchgangskoeffizient k** berücksichtigt den Wärmeübergang vom ersten Fluid zur Trennwand, die Wärmeleitfähigkeit der Trennwand und den Wärmeübergang von der Trennwand zum zweiten Fluid.

Im Falle einer **ebenen Wand** errechnet sich der Wärmedurchgangskoeffizient nach

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (\text{Gl.2.4.3.5}) \quad k: \text{Wärmedurchgangskoeffizient an ebener Wand [W/(m}^2\text{K)]}$$

α_1 : Wärmeübergangskoeffizient Fluid 1/Wand [W/(m²K)]

α_2 : Wärmeübergangskoeffizient Fluid 2/Wand [W/(m²K)]

l: Dicke der Wand [m]

λ : Wärmedurchgangskoeffizient der Wand [W/(mK)]

Bei **mehrschichtigen Wänden** erweitert sich Gl.2.4.3.5 pro Schicht jeweils um einen Koeffizienten Wanddicke/Wärmeleitfähigkeit dieser Schicht.

Bei **Rohrleitungen** wird die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten schwieriger, da die unterschiedlich großen Ein- und Austrittsflächen berücksichtigt werden müssen. Die Berechnungsformeln sind in der entsprechenden Literatur zu finden.

□ Aufgabe: Wie groß ist die Wärmedurchgangszahl bei einem Wärmetauscher, wenn auf einer Wärmeaustauschfläche von 2.5 m^2 bei einem mittleren Temperaturunterschied von 65°C stündlich eine Wärmemenge von 55000 kJ ausgetauscht wird?

■ Lösung:

2.4.4 Wärmetauscher

Ein Wärmetauscher ist ein Apparat, in dem Wärme von einem strömenden Stoff (Flüssigkeit oder Gas) hoher Temperatur auf einen strömenden Stoff niedrigerer Temperatur übertragen wird, wobei diese Stoffe sich nicht vermischen.

Wärmetauscher bezeichnet man auch noch als **Rekuperatoren**.

Verändert sich in einem Apparat durch den Wärmestrom der Aggregatzustand eines Stoffes, so spricht man nicht von einem Wärmetauscher, sondern je nach Änderung von einem **Verdampfer** oder einem **Kondensator**.

○ Strömungsführung

Je nach Richtung der beiden Stoffströmungen zueinander unterscheidet man beim Betrieb eines Wärmetauschers zwischen Gleichstrom, Gegenstrom und Kreuzstrom.

- Gleichstrom

Beide Stoffe strömen in gleicher Richtung entlang einer Trennwand (Abb.2.4.4.1).



Die Temperaturdifferenz der beiden Stoffe am Einlauf ($T_{01}-T_{02}$) ist am größten.
Der Wärmeaustausch zwischen den beiden Stoffen ist relativ gering.

Abb.2.4.4.1: Stoffführung bei Gleichstrom

Die Veränderung der Temperatur der beiden Stoffströme ist in Abb.2.4.4.2 über der Austauschfläche aufgetragen. Die Austauschfläche nimmt mit zunehmender Länge der Leitungen, durch die die Stoffe strömen, zu.

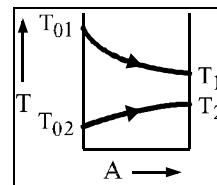


Abb.2.4.4.2: Temperaturverlauf bei Gleichstrom

- Gegenstrom

Die beiden Stoffe strömen in entgegengesetzter Richtung (Abb.2.4.4.3)

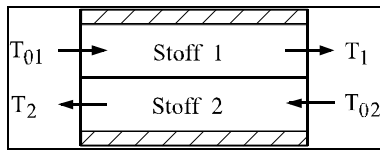


Abb.2.4.4.3: Stoffführung bei Gegenstrom

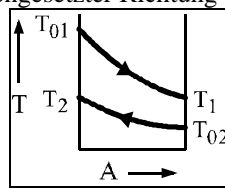
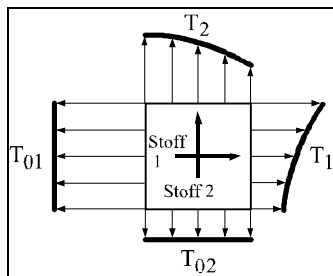


Abb.2.4.4.4: Temperaturverlauf bei Gegenstrom

Die Temperaturdifferenz ist bei Gegenstrom im Mittel größer als bei Gleichstrom, so daß man einen größeren Wärmeaustausch erreicht. Der Verlauf der Temperatur der Stoffströme, dargestellt in Abb.2.4.4.4, zeigt daß die Temperaturänderungen der jeweiligen Stoffe größer ist als bei Gleichstrom.

- Kreuzstrom

Die beiden Stoffe strömen quer zueinander (Abb.2.4.4.5).



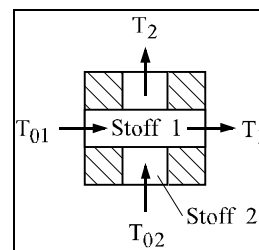
bei Kreuzstrom

Der Wärmeaustausch liegt zwischen Gleichstrom- und Gegenstromverfahren. Über den Querschnitt der Stoffströmung ist die Temperatur nicht gleichmäßig verteilt, wie in Abb.2.4.4.6 zu erkennen ist.

Diese unregelmäßige Temperatur-

Abb.2.4.4.5: Stromführung bei verteilung, bedingt durch die

Kreuzstrom Abb.2.4.4.6: Temperaturverlauf Stromführung, ist stärker ausgeprägt als im Gleich- oder Gegenstromverfahren.

**○ Berechnungen**

Grundlegend für alle Berechnungen sind

$$\text{Gl.2.4.2.1: } \dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T - T_0) \quad \text{und}$$

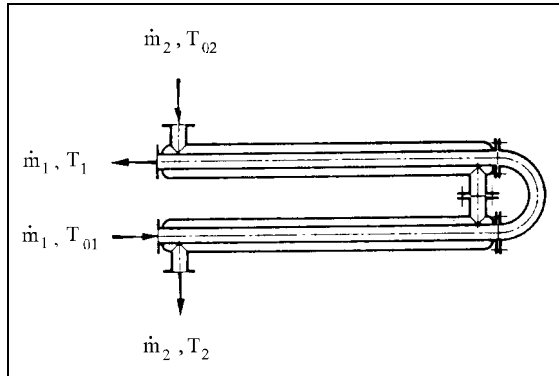
$$\text{Gl.2.4.3.4: } \dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$$

Die Wärmedurchgangszahl k hängt neben den Stoffeigenschaften auch von den Strömungs-geschwindigkeiten ab. Eine Verschlechterung des Wärmeüberganges durch Verschmutzung der Austauschflächen muß eventuel berücksichtigt werden. Daneben ist die Verteilung der Wärme über den Querschnitt der Strömung schwierig zu erfassen. Da zudem unterschiedliche Stromführungen möglich sind, können die Berechnungen immer nur eine Annäherung an die reell erzielten Ergebnisse sein.

○ Bauarten

- Doppelrohrwärmetauscher

Die einfachste Bauform eines Wärmetauschers besteht aus zwei konzentrischen Rohren d.h. einem Rohr das in einem größeren Rohr angeordnet ist. Der eine Stoff fließt im inneren Rohr, der andere im ringförmigen Raum zwischen Innen- und Außenrohr. Abb.2.4.4.7 zeigt einen Doppelrohrwärmetauscher, der im Gegenstrom betrieben wird.



Der wärmere Stoff kann sowohl innen als auch außen geführt werden. Handelt es sich hierbei beispielsweise um eine Flüssigkeit unter höherem Druck, wird man aus Festigkeitsgründen das innere Rohr wählen.

Doppelrohrwärmetauscher sind besonders geeignet für schlammige Flüssigkeiten, da keine Ecken oder Toträume im Strömungsweg sind. In Abb.2.4.4.19 ist eine Doppelrohr-Anlage abgebildet.

Abb.2.4.4.7: Doppelrohrwärmetauscher

- Rohrbündelwärmetauscher oder Röhrenkesselwärmetauscher

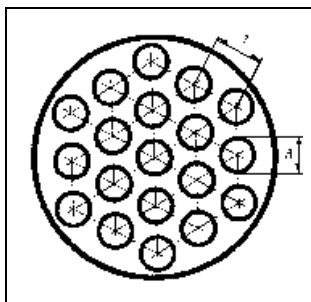
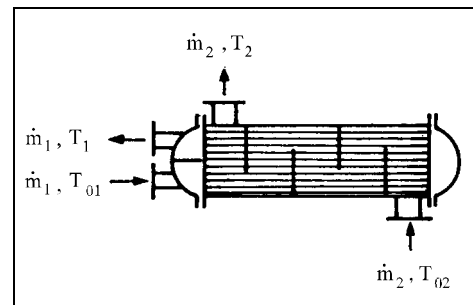
Um den Wärmedurchgang zu verbessern, wird bei Rohrbündelwärmetauschern die Austauschfläche zwischen den beiden Stoffströmungen vergrößert.

Hierzu wird in ein zylindrischer Behälter mit einer großen Anzahl an Rohren gefüllt (Abb.2.4.4.8), die an ihren Enden in gelochte Platten (Abb.2.4.4.9) eingesetzt sind.

Durch Einbauten (Schikanen) kann die Strömungsführung beeinflusst werden, so daß ein besserer Wärmeaustausch stattfindet

Rohrbündel-WT

Abb.2.4.4.8: Prinzip eines Rohrbündel-WT



Die Verbindungen zwischen den Rohren und den Wänden entstehen durch Schweißen, Walzen oder Schrauben. Solche Konstruktionen sind aufwendig, bedenkt man die Wärmeausdehnung von Metallen und die dadurch auftretenden Spannungen und Abdichtungsprobleme.

Abb.2.4.4.9: Verteilung der Rohre in den Stirnplatten

Die Abb.2.4.4.10 zeigt einen Rohrbündelwärmetauscher im Schnitt. Bilder von verschiedenen Rohrbündelbauformen sind in den Abb.2.4.4.14, 2.4.4.15, 2.4.4.17 und 2.4.4.19 zu finden.

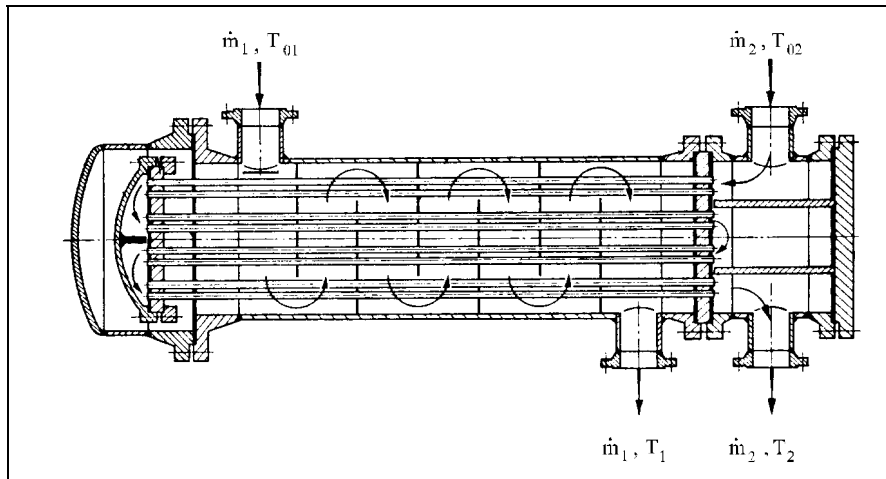


Abb.2.4.4.10: Schnitt durch Rohrbündel-Wärmetauscher

- Spiralwärmetauscher

Sehr große Austauschflächen bieten Spiralwärmetauscher, die aus zwei spiralförmig aufgerollten Blechen bestehen (Abb.2.4.4.11), die an den Stirnflächen durch Platten abgeschlossen sind.

Sie nehmen weniger Platz ein als Rohrbündelwärmetauscher, sind leicht demontierbar und können gut gereinigt werden. Für Flüssigkeiten mit hohen Drücken sind sie jedoch ebenso wenig geeignet wie für Gase.

Spiralwärmetauscher haben sich insbesondere in der Lebensmittelindustrie gut bewährt, beispielsweise zum Kühlen von Milch, Bier oder Fruchtsäften. In Abb.2.4.4.16 ist ein Spiralwärmetauscher dargestellt.

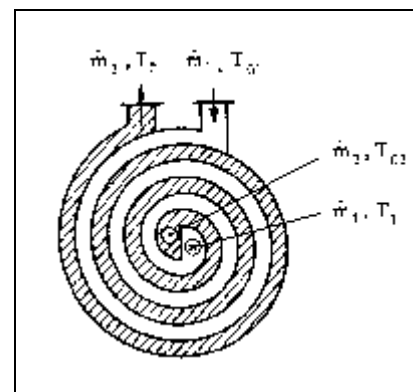


Abb.2.4.4.11: Funktionsweise eines Spiralwärmetauschers

- Plattenwärmetauscher

Plattenwärmetauscher bestehen aus mehreren übereinander angeordneten Schichten, von denen jeweils jede zweite (siehe Abb.2.4.4.12) von dem wärmeabgebenden bzw. dem wärmeaufnehmendem Stoff durchströmt wird.

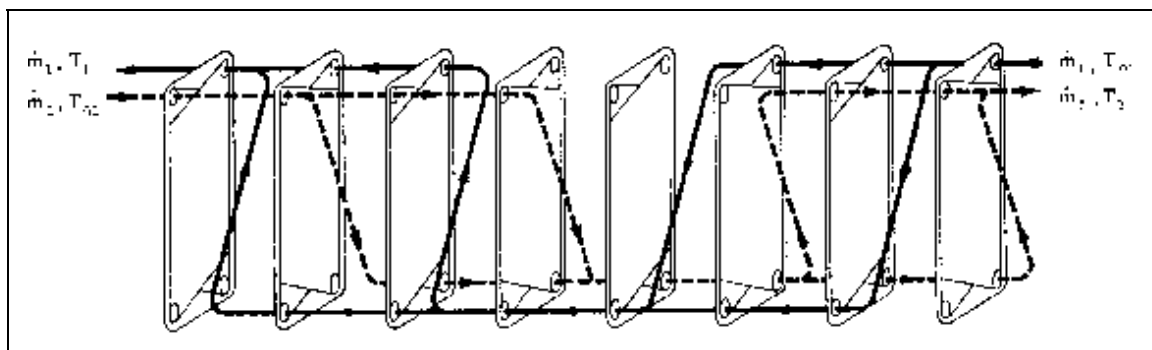


Abb.2.4.4.12: Strömungsrichtungen im Plattenwärmetauscher

Die Flüssigkeiten strömen zwischen den Platten (Abb.2.4.4.13) großflächig in einem dünnen Film. Dies führt zu einem guten Wärmeaustausch.

Plattenwärmetauscher sind besonders günstig in Hinsicht Demontage und Reinigung. Zudem kann durch Veränderung der Anzahl der Platten der Einsatzbereich der Apparate verändert werden.

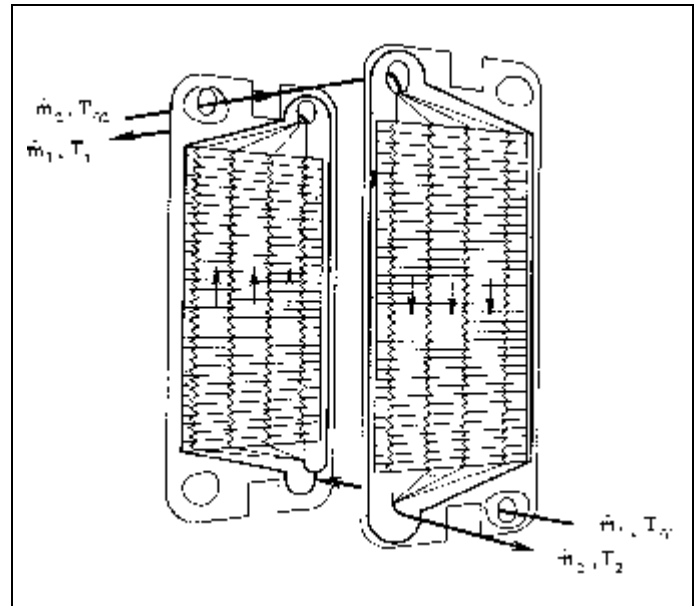


Abb.2.4.4.13: Verteilung der Flüssigkeiten zwischen den Platten

- Andere Bauarten

Neben diesen am häufigsten vorzufindenden Bauarten gibt es noch viele weitere Arten, die zum Teil speziell für bestimmte Anwendungen entwickelt und weiterentwickelt wurden.

Der grundsätzliche Aufbau anderer Bauformen ist jedoch der gleiche wie bei den vorgestellten Modellen.

2.4.5 Regeneratoren

Regeneratoren sind Apparate, die abwechselnd von einem warmen und einem kalten Stoff durchströmt werden, wobei dies fast nur Gase sind. Das Material im Regenerator, die sogenannte Speichermasse, wird beim Durchströmen des warmen Gases erwärmt und gibt anschließend diese Wärme an den durchfließenden, kalten Gasstrom ab.

Regeneratoren arbeiten demnach periodisch. Um einen kontinuierlichen Betrieb einer Produktionsanlage zu ermöglichen müssen deshalb mindestens zwei Apparate vorhanden sein, die abwechselnd von warmem und kaltem Gas durchströmt werden. Daneben gibt es aber auch Apparate mit bewegter Speichermasse, die kontinuierlich von zwei Gasen durchströmt werden.

Regeneratoren werden fast nur im Hüttenwesen und in der Tieftemperaturtechnik verwendet.