

Grundlagen der Wärmetechnik

Tab. 21.2: Dichte ρ und spezifisches v Volumen von Wasser bei verschiedenen Temperaturen

ϑ in °C	-50	0 (Eis)	0 (Wasser)	4	20	30	40	60	100 (Wasser)	100 (Dampf)
ρ in kg/dm ³	0,89	0,9167	0,9998	1,0000	0,9982	0,9956	0,9922	0,9832	0,9583	0,0006
v in dm ³ /kg	1,124	1,0906	1,0002	1,0000	1,0018	1,0044	1,0079	1,0171	1,0435	1673

Wärmemenge

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

3,6 kJ = 1 Wh

Q : Wärmemenge in kJ;Wh
 m : Masse in kg
 c : spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg·K) Wh/(kg·K)
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K

Wärmeenergie (Wärmemenge)

Feste und flüssige Brennstoffe:

$$Q = m_B \cdot H_i$$

Gasförmige Brennstoffe:

$$Q = V_B \cdot H_{i,B}$$

Q : Verbrennungswärmemenge in kWh
 m_B : Brennstoffmasse in kg
 H_i : Heizwert in kWh/kg
 V_B : Brennstoffvolumen bei Betriebszustand in m³
 $H_{i,B}$: Betriebsheizwert in kWh/m³

Tab. 37.1: Heizwerte einiger Brennstoffe (Mittelwerte; $H_{i,B}$ für Orte in 300 m Höhe bei $\vartheta = 15^\circ\text{C}$)

feste Brennstoffe	H_i kWh/kg	flüssige Brennstoffe	H_i		gasförmige Brennstoffe	kWh/m ³	$H_{i,B}$ kWh/dm ³ -flüssig
			kWh/kg	kWh/dm ³			
Steinkohle	8,7	Heizöl EL	11,86	10,0	Erdgas LL	7,9	–
Koks	8,0	Heizöl S	11,00	10,2	Erdgas E	9,9	–
Braunkohle (Briketts)	5,3	Dieselöl	11,6	9,7	Propan	25,9	6,3
Holz, Lufttrocken	4,0	(Flüssiggas)	12,7		Butan	32,9	7,1

Wärmeleistung

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{t}$$

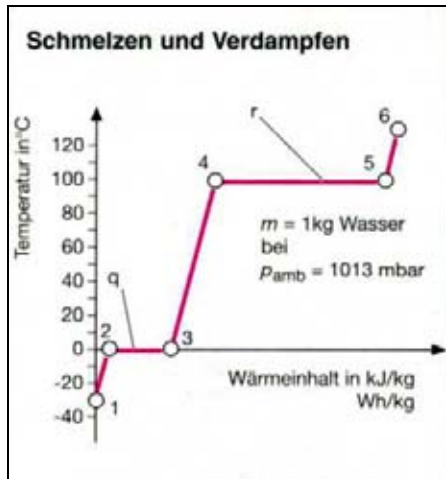
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

1 kJ/s = 1000 W

\dot{Q} : Wärmeleistung in kJ/s; W
 Q : Wärmemenge in kJ; Wh
 c : spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg·K); Wh/(kg·K)
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K
 t : Zeit in s; h

Tab. 21.3: Spezifische Wärmekapazität c ausgewählter Stoffe in W/h (kg·K) bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und $p_{\text{amb}} = 1,013$ bar

Stoff	Beton	Eis	PE-HD	Heizöl EL	Kupfer	Luft	Baustahl	Wasser	Wasserdampf bei 100°C	Messing
c	0,244	0,580	0,597	0,523	0,106	0,280	0,136	1,163	0,565	0,108



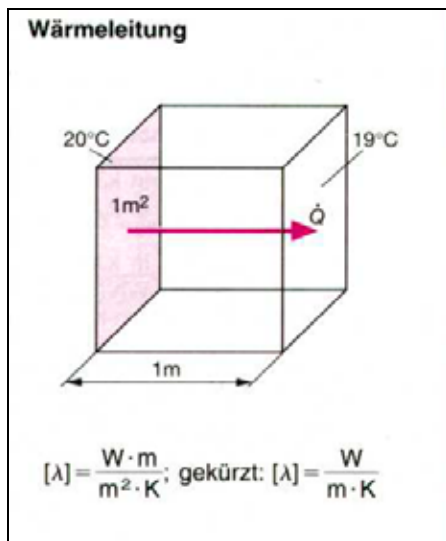
$$Q_s = m \cdot q$$

$$Q_v = m \cdot r$$

Q_s : Schmelzwärme in kJ; Wh
 m : Masse in kg
 q : spezifische Schmelzwärme in kJ/kg; Wh/kg
 Q_v : Verdampfungswärme in kJ; Wh
 r : spezifische Verdampfungswärme in kJ/kg; Wh/kg

Tab Zustand und spezifische Wärme des Wassers

Bereich	Zustand des Wassers	Spezifische Wärme
1 - 2	fest (Eis)	$c_{\text{Eis}} = 0,57 \text{ Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
2 - 3	fest - flüssig	$q = 92,2 \text{ Wh/kg}$
3 - 4	flüssig	$c_{\text{Wasser}} = 1,163 \text{ Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
4 - 5	flüssig - gasförmig	$r = 627,2 \text{ Wh/kg}$
5 - 6	gasförmig (Dampf)	$c_{\text{Dampf}} = 0,57 \text{ Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$



$$\dot{Q} = A \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta\vartheta$$

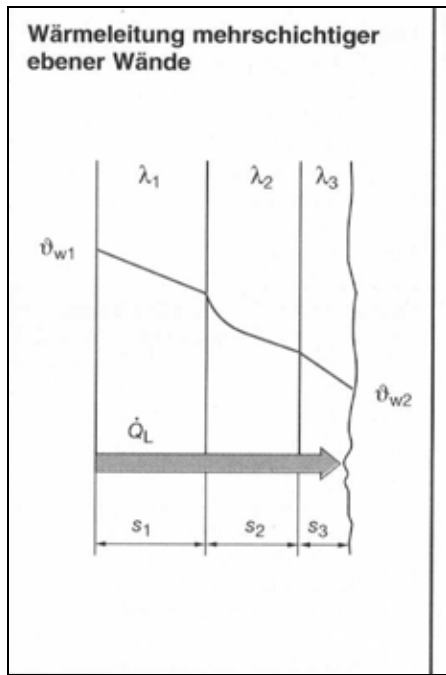
$$\dot{Q} = \frac{A \cdot \Delta\vartheta}{R_\lambda}$$

$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda}$$

\dot{Q} : Wärmestrom in W
 A : Fläche in m^2
 λ : Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K
 d : Bauteildicke in m
 R_λ : Wärmeleitwiderstand in $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Tab Wärmeleitfähigkeit λ ausgewählter Stoffe

Stoff	Al	Cu	Stahl unlegiert	Zn (Titanzink)	Hohllochziegel	PUR-Hartschaum
λ in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	221	390	48...58	116	0,50...0,96	0,020...0,035



$$\dot{Q}_L = \frac{A \cdot \Delta\vartheta}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}}$$

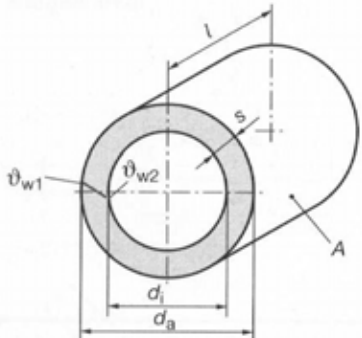
$$\Delta\vartheta = (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2})$$

\dot{Q}_L : Wärmestrom durch Leitung in W
 A : Wärmeübertragungsfläche in m^2
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz zwischen den Baukörpern in K
 s_1, s_2, s_3 : Wandstärke der Schicht in m
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Tab. 84.1: Wärmeleitfähigkeit λ

Werkstoff	λ in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Aluminium	221
Schamottestein (Kesselstein)	0,46...4
Stahl/Gusseisen 2% C	50
X 12 CrNi 18 8	15
PE-X	0,43

Wärmeleitung durch Rohrwände



$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta\vartheta}{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)}$$

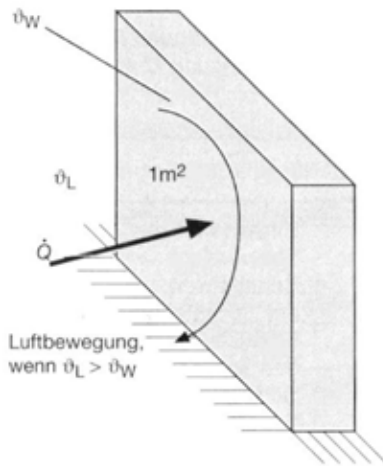
Näherungsformel:

$$\dot{Q}_L \approx \frac{\lambda}{s} \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_m \cdot l \cdot (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2})$$

$$d_m = \frac{d_a + d_i}{2}$$

\dot{Q}_L : Wärmestrom durch Leitung in W
 λ : Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
 l : Rohrlänge in m
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K
 d_a : äußerer Durchmesser in m
 d_i : innerer Durchmesser in m
 d_m : mittlerer Durchmesser in m
 s : Wandstärke in m
 $\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2}$: Temperaturdifferenz in K

Wärmeübergang (Wärmekonvektion)



$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s$$

Wärmeübergang nur durch Gasbewegung:

$$\dot{Q}_k = A \cdot \alpha_k \cdot \Delta\vartheta$$

Wärmeübergang nur durch Strahlung:

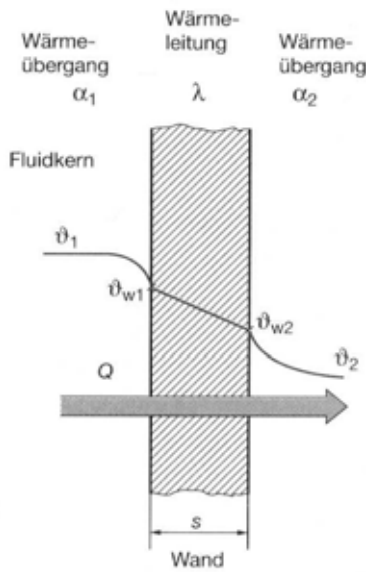
$$\dot{Q}_s = A \cdot \alpha_s \cdot \Delta\vartheta$$

\dot{Q} : Wärmestrom in W
 A : Fläche in m²
 α : Wärmeübergangszahl in W/(m²·K)
 $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K
 α_k : Wärmeübergangszahl (Gasbewegung) in W/(m²·K)
 α_s : Wärmeübergangszahl (Strahlung) in W/(m²·K)

Tab 23.1: Wärmeübergangszahl α_k für vertikale ebene Wände

	Luftgeschwindigkeit $v < 5\text{m/s}$				Luftgeschwindigkeit $v > 5\text{m/s}$			
v in m/s	0,5	1	2,5	4,5	6	8	10	14
α_k in W/(m ² K)	8,3	10,4	16,7	25,1	31,9	40,1	48,0	62,8

Wärmedurchgang



$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$$

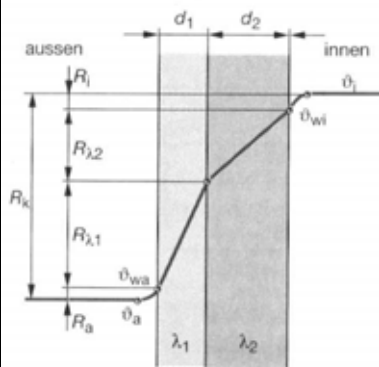
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

- \dot{Q} : Wärmestrom in W
- k : Wärmedurchgangszahl in W/(m²·K)
- A : Wärmeübergangsfläche in m²
- $\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz in K
- s : Wandstärke in m
- α_1 : Wärmeübergangszahl innen in W/(m²·K)
- α_2 : Wärmeübergangszahl außen in W/(m²·K)
- λ : Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)

Tab.85.1: Wärmedurchgangszahl k

Apparat	Fluid	k in W/(m ² ·K)
Rohrbündelwärmeaustauscher	Gas-Gas $p_{\text{abs}} > 200\text{bar}$	150 – 500
	Gas-Flüssig. $p_{\text{abs}} > 200\text{bar}$	200 – 400
	Flüssigkeit-Flüssigkeit	150 – 1400
Rohrbündelverdampfer	Heißdampfzähe Flüssigkeit	300 – 900
Rührbehälter	Dampf – Flüssigkeit	500 – 1500

Wärmedurchgangskoeffizient und Temperaturverlauf



$$k = \frac{1}{R_k}$$

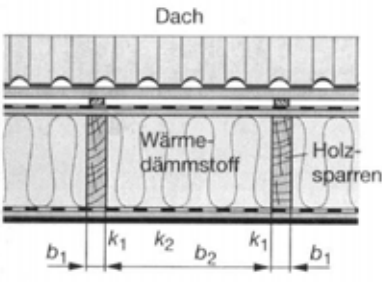
$$R_k = R_i + R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_a$$

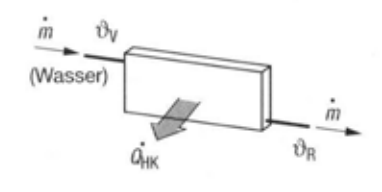
$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda}$$

Temperaturverlauf:

$$\frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{R_k} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{wi}}{R_i} = \dots$$

- k : Wärmedurchgangszahl (k -Wert) in W/(m²·K)
- R_k : Wärmedurchgangswiderstand in m²·K/W
- R_i : innerer Wärmeübergangswiderstand (→ Tab. 48.1) in m²·K/W
- R_λ : Wärmeleitwiderstand in m²·K/W
- R_a : äußerer Wärmeübergangswiderstand (→ Tab.48.1) in m²·K/W
- d : Baustoffdicke in m
- λ : Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes (→ Tab.48.3) in W/(m·K)

Misch-k-Wert 	$k_M = \frac{A_1 \cdot k_1 + A_2 \cdot k_2 + \dots}{A_1 + A_2 + \dots}$ $A_1 = l_1 \cdot b_1 \quad \text{usw.}$ <p>Für $l_1 = l_2 = \dots$ gilt:</p> $k_M = \frac{b_1 \cdot k_1 + b_2 \cdot k_2 + \dots}{b_1 + b_2 + \dots}$	k_M : Misch-k-Wert in $W/(m^2 \cdot K)$ A_1, A_2, \dots : Fläche des Bauteils in m^2 l_1, l_2, \dots : Länge des Bauteils in m b_1, b_2, \dots : Breite des Bauteils in m k_1, k_2, \dots : k-Wert des Bauteils in $W/(m^2 \cdot K)$
--	---	---

Massenstrom des Heizmittels 	$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{HK}}{c \cdot \Delta \vartheta}$ $\Delta \vartheta = \vartheta_V - \vartheta_R$	\dot{m} : Massenstrom des Heizmittels in kg/h \dot{Q}_{HK} : Wärmeleistung der Heizfläche in W c : spezif. Wärmekapazität Wasser in $Wh/(kg \cdot K)$ ($c = 1,163 \text{ Wh}/(kg \cdot K)$) $\Delta \vartheta$: Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf in K (= Temperaturspreizung)
---	--	---

Quelle: Baer/Günther/Patzel/Wagner;
 Versorgungstechnik Formelsammlung;
 Westermann Verlag, Braunschweig; 1998