

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/dm³	0,89	0,9167	0,9998	1,0000	0,9982	0,9956	0,9922	0,9832	0,9583	0,0006
v in dm³/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

<p>Wärmeenergie (Wärmemenge)</p>	<p>Feste und flüssige Brennstoffe:</p> $Q = m_B \cdot H_i$ <p>Gasförmige Brennstoffe:</p> $Q = V_B \cdot H_{i,B}$	<p>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</p>
---	---	---

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 kWh/kg	gasförmige Brennstoffe	$H_{i,B}$ kWh/m³	$H_{i,B}$ kWh/dm³ -flüssig
Steinkohle	8,7	Heizöl EL	11,86	10,0	7,9	—
Koks	8,0	Heizöl S	11,00	10,2	9,9	—
Braunkohle (Briketts)	5,3	Dieselöl	11,6	9,7	25,9	6,3
Holz, Lufttrocken	4,0	(Flüssiggas)	12,7	Butan	32,9	7,1

<p>Wärmeleistung</p>	$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ $\dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta \vartheta}{t}$ <p>$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta \vartheta$</p> <p>1 kJ/s = 1000 W</p>	<p>\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</p>
-----------------------------	--	---

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

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

Schmelzen und Verdampfen		$Q_s = m \cdot q$	$Q_v = m \cdot r$	Q_s : Schmelzwärme m : Masse q : spezifische Schmelzwärme Q_v : Verdampfungswärme r : spezifische Verdampfungswärme
<p>$m = 1\text{ kg Wasser}$ $P_{\text{amb}} = 1013\text{ mbar}$</p>				in kJ; Wh in kg in kJ/kg; Wh/kg
Tab Zustand und spezifische Wärme des Wassers				in kJ; Wh in kg in kJ/kg; Wh/kg
Bereich	Zustand des Wassers	Spezifische Wärme		
1 – 2		c_{Eis}	= 0,57 Wh/(kg · K)	
2 – 3	fest (Eis)	q	= 92,2 Wh/kg	
3 – 4	fest – flüssig	c_{Wasser}	= 1,163 Wh/(kg · K)	
4 – 5	flüssig	r	= 627,2 Wh/kg	
5 – 6	flüssig – gasförmig	c_{Dampf}	= 0,57 Wh/(kg · K)	

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

Wärmeleitung mehrschichtiger ebener Wände		$\dot{Q}_L = \frac{A \cdot \Delta \vartheta}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}}$	\dot{Q}_L : Wärmestrom durch Leitung A : Wärmeübertragungsfläche $\Delta \vartheta$: Temperaturdifferenz zwischen den Baukörpern s_1, s_2, s_3 : Wandstärke der Schicht $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: Wärmeleitfähigkeit
		$\Delta \vartheta = (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2})$	
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	

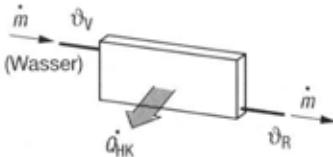
Wärmeleitung durch Rohrwände		$\dot{Q}_L = \frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta \vartheta}{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)}$ <p>Näherungsformel:</p> $\dot{Q}_L \approx \frac{\lambda}{s} \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_m \cdot l (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2})$ $d_m = \frac{d_a + d_i}{2}$	\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)		$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$ $\alpha = \alpha_k + \alpha_s$ <p>Wärmeübergang nur durch Gasbewegung:</p> $\dot{Q}_k = A \cdot \alpha_k \cdot \Delta \vartheta$ <p>Wärmeübergang nur durch Strahlung:</p> $\dot{Q}_s = A \cdot \alpha_s \cdot \Delta \vartheta$	\dot{Q} : Wärmestrom in W A : Fläche in m^2 α : Wärmeübergangszahl in $W/(m^2 \cdot K)$ $\Delta \vartheta$: Temperaturdifferenz in K α_k : Wärmeübergangszahl (Gasbewegung) in $W/(m^2 \cdot K)$ α_s : Wärmeübergangszahl (Strahlung) in $W/(m^2 \cdot K)$
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
α_k in $W/(m^2 K)$	8,3	10,4	16,7
	4,5	6	8
	31,9	40,1	48,0
	10	14	
	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 k : Wärmedurchgangszahl A : Wärmeübergangsfläche $\Delta \vartheta$: Temperaturdifferenz s : Wandstärke α_1 : Wärmeübergangszahl innen α_2 : Wärmeübergangszahl außen λ : Wärmeleitfähigkeit
<p>Wärme-übergang α_1 Wärme-leitung λ Wärme-übergang α_2</p> <p>Fluidkern Wand</p> <p>ϑ_1 ϑ_{w1} ϑ_{w2} ϑ_2</p> <p>Q</p>					in W in $W/(m^2 \cdot K)$ in m^2 in K in m in $W/(m^2 \cdot K)$ in $W/(m^2 \cdot K)$ in W in $W/(m \cdot K)$
Tab. 85.1: Wärmedurchgangszahl k					
Apparat	Fluid	k in $W/(m^2 \cdot K)$			
Rohrbündel-wärmeaus-tauscher	Gas-Gas $p_{abs} > 200\text{bar}$	150 – 500			
	Gas-Flüssigk. $p_{abs} > 200\text{bar}$	200 – 400			
	Flüssigkeit-Flüssigkeit	150 – 1400			
Rohrbündel-verdampfer	Heißdampf-zähe Flüssigkeit	300 – 900			
Rühr-behälter	Dampf – Flüssigkeit	500 – 1500			

Wärmedurchgangskoeffizient und Temperaturverlauf		$k = \frac{1}{R_k}$	$R_k = R_i + R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_a$	$R_{\lambda} = \frac{d}{\lambda}$	k : Wärmedurchgangszahl (k -Wert) R_k : Wärmedurchgangswiderstand in $m^2 \cdot K/W$ R_i : innerer Wärme-übergangswiderstand (→ Tab. 48.1) R_{λ} : Wärmeleitwiderstand in $m^2 \cdot K/W$ R_a : äußerer Wärmeübergangswiderstand (→ Tab. 48.1) d : Baustoffdicke λ : Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes (→ Tab. 48.3)
<p>aussen innen</p> <p>R_i d_1 d_2</p> <p>ϑ_i ϑ_{wi}</p> <p>$R_{\lambda 2}$ $R_{\lambda 1}$</p> <p>ϑ_{wa} ϑ_a</p> <p>λ_1 λ_2</p>					

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 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 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 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
---------------------	---	---

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 $\text{Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ($c = 1,163 \text{ Wh/kg} \cdot \text{K}$) $\Delta \vartheta$: Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf in K (= Temperaturspreizung)
------------------------------------	--	---

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