

Bei der Wärmeübertragung kann man drei Transportvorgänge voneinander unterscheiden:

- Wärmeleitung
- Wärmeübergang/Konvektion
- Wärmestrahlung

Der Wärmetransport durch Leitung oder Konvektion benötigt einen stofflichen Energieträger, dies können Atome und Moleküle sein. Die Wärmestrahlung benötigt keinen stofflichen Energieträger und kann auch im Vakuum Wärme übertragen, bekanntestes Beispiel: Sonnenwärme.

6.1 Wärmeleitung

Wird beispielsweise ein Kaffeelöffel aus Metall in heißen Kaffee getaucht, erwärmt sich das Stielende in kurzer Zeit.

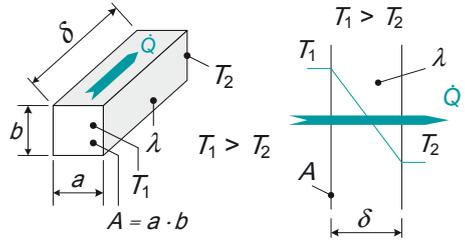
Besteht der Löffelgriff aus Holz oder Kunststoff, erwärmt sich das Stielende sehr viel langsamer.

Hieraus lässt sich folgern, dass der Wärmetransport in Feststoffen durch Wärmeleitung erfolgt und dass die unterschiedlichen Feststoffe verschiedene Wärmeleitfähigkeiten haben. Man kann sich diesen Vorgang so vorstellen, dass die Moleküle des Stoffs an der wärmeren Stelle beginnen stärker zu schwingen. Hierbei geben sie Energie (= Wärme) an benachbarte Moleküle ab, die daraufhin auch stärker schwingen. Die stärkere Schwingung der Moleküle pflanzt sich also innerhalb des Feststoffs fort.

Auch in Flüssigkeiten und Gasen findet auf diese Weise Wärmeleitung statt. Da aber die Moleküle weniger dicht gepackt sind, ist die Wärmemenge, die übertragen werden kann, deutlich geringer als beim Feststoff. Meistens wird die Wärmeleitung in Flüssigkeiten und Gasen durch Konvektionsvorgänge überlagert.

Um die Gesetzmäßigkeit herzuleiten, übertragen wir zunächst das obige Beispiel auf einen beliebigen Metallstab der Länge δ .

Abb. 6.1 Wärmeleitung in einem Stab (links) und in einer ebenen Wand (rechts)



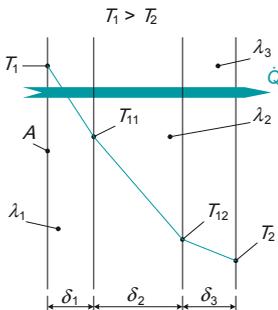
Die übertragene Wärmemenge hängt von folgenden Größen ab:

- Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ in K
Je höher die Temperaturdifferenz, desto größer ist die übertragene Wärmemenge.
- T_1, T_2 : Oberflächentemperatur
- Wärmeübertragungsfläche A in m^2
Je größer die Wärmeübertragungsfläche, desto größer ist die übertragene Wärmemenge.
- Länge (= Wanddicke) des Stabs δ in m
Je länger der Stab, desto geringer ist die übertragene Wärmemenge.
- Werkstoff \Rightarrow Wärmeleitkoeffizient λ in $\frac{W}{m \cdot K}$
Je größer der Wärmeleitkoeffizient, desto größer ist die übertragene Wärmemenge.

Der Wärmestrom ergibt sich damit zu:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{in} \quad W = \frac{W}{m \cdot K} \cdot \frac{1}{m} \cdot m^2 \cdot K \quad (34)$$

6.1.1 Wärmeleitung durch eine mehrschichtige Wand



- T_1, T_2 Oberflächentemperaturen
- T_{11}, T_{12} Grenzschichttemperaturen innerhalb der Wand
- A Wandfläche
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ Wärmeleitkoeffizient der jeweiligen Schicht
- $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ Dicke der jeweiligen Schicht

Abb. 6.2 Qualitativer Temperaturverlauf in einer mehrschichtigen Wand

In jeder einzelnen Schicht gilt Gleichung (34). Wegen der unterschiedlichen Werkstoffe ergeben sich drei verschiedene Temperaturdifferenzen. Die Grenzschichttemperaturen T_{11} und T_{12} sind in der Regel nicht bekannt. Der Wärmestrom kann nur aus der bekannten Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ berechnet werden. Anschließend können die Grenzschichttemperaturen bestimmt werden.

Vergleicht man die Gleichungen für die Wärmeleitung mit den Gleichungen für elektrischen Strom, stellt man fest, dass sich in beiden Gebieten die Gleichungen entsprechen. Man nennt dies Analogie der Elektrotechnik zur Wärmelehre.

Hintereinanderliegende Wärmewiderstände lassen sich ebenso addieren wie die elektrischen Widerstände der Reihenschaltung.

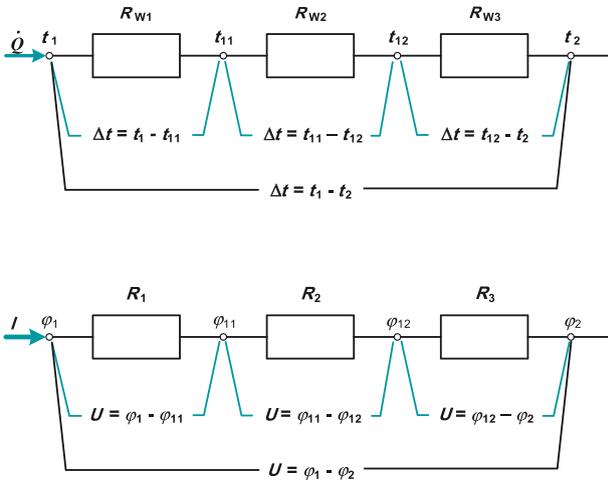


Abb. 6.3 Elektroanalogie für die Wärmeleitung in einer dreischichtigen Wand

Für den **Wärmewiderstand** einer wärmeleitenden Schicht gilt:

$$R_W = \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{1}{A} \quad \text{in} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}} = \text{m} \cdot \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot \frac{1}{\text{m}^2} \quad (35)$$

Als Gleichungen findet man dann für den Gesamtwärmewiderstand und für den Wärmestrom:

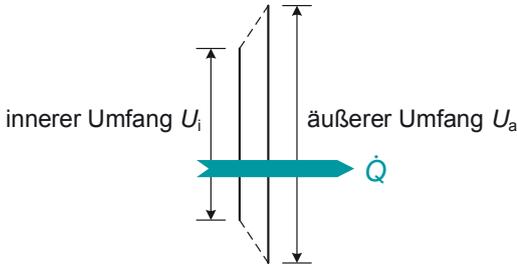
$$R_{W, \text{ges}} = R_{W1} + R_{W2} + R_{W3} + \dots = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots \right) \frac{1}{A}$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_{W, \text{ges}}} \cdot \Delta T = \frac{A}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots} \cdot \Delta T$$

6.1.2 Wärmeleitung durch einen Hohlzylinder

Die Berechnung des Wärmestroms, der durch die Wand eines Hohlzylinders, also ein Rohr, fließt, ist mit den oben aufgeführten Gleichungen streng genommen nicht möglich. Warum?

Die Gleichung für den Stab oder für die ebene Wand geht davon aus, dass die durchströmte Fläche auf beiden Seiten gleich groß ist. Wenn man aber von innen nach außen durch eine Rohrwand schreitet, wird die Fläche allmählich größer.



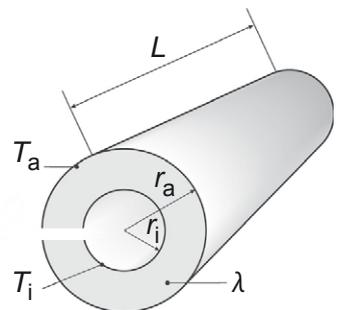
Nur bei sehr dünnen Wandstärken δ darf man mit Gleichung (34) arbeiten; es muss gelten $U_i \approx U_a$.

Abb. 6.4 Abwicklung eines Hohlzylinders mit $d_a = 1,5d_i$

Die Temperaturverteilung ist nicht mehr linear, sondern logarithmisch. Deshalb erhält man für Hohlzylinder folgende Gleichungen:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot 2\pi r L \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{T_i - T_a}{\ln \frac{r_a}{r_i}} = \lambda \cdot 2\pi L \cdot \frac{1}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot (T_i - T_a)$$

$$R_W = \frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{2\pi \cdot L \cdot \lambda}$$



6.2 Wärmeübergang

Der Wärmetransport durch Konvektion (= Wärmeübergang) ist genauso wie die Wärmeleitung an das Vorhandensein von Materie gebunden. Sie tritt auf, wenn der Wärmeaustausch zwischen einem strömenden Gas¹ oder einer strömenden Flüssigkeit und einer festen Oberfläche² stattfindet. Die treibende Kraft ist auch hier die Temperaturdifferenz, und zwar die Differenz zwischen der Fluidtemperatur T_F und der Wandtemperatur T_W an der Oberfläche.

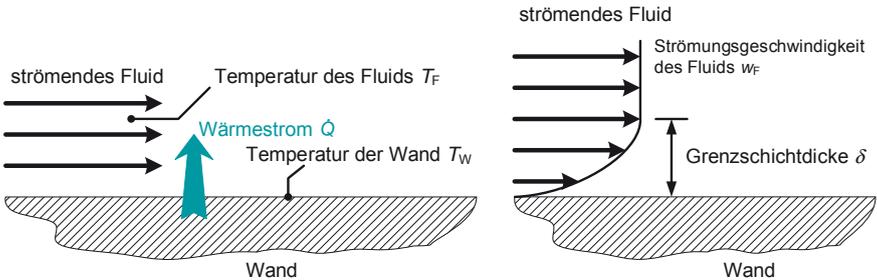


Abb. 6.5 Wärmeübertragung an einer ebenen Wand mit $T_W > T_F$;
links: Die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_W - T_F$ führt zu einem Wärmestrom \dot{Q} .
rechts: Geschwindigkeitsgrenzschicht zwischen Fluid und Wand

In der Realität tritt Reibung auf. Sie wirkt am stärksten zwischen Fluid und Wand. Aber auch zwischen den einzelnen Molekülen des Fluids tritt Reibung durch die Berührung auf. Daher bilden sich zwei Grenzschichten innerhalb des Fluids aus: eine für die Geschwindigkeit und eine für die Temperatur.

Die Fluidmoleküle, die unmittelbar an der Wand liegen, müssen die Strömungsgeschwindigkeit $w = 0$ haben. Diese Moleküle bremsen die Moleküle darüber. Die Geschwindigkeit der Fluidmoleküle wächst deshalb erst allmählich auf ihren eigentlichen Wert an.

Ähnliches passiert mit der Temperatur. Die Moleküle, die unmittelbar an der Wand liegen, müssen im thermischen Gleichgewicht mit der Wand stehen. Das bedeutet aber, dass sie die gleiche Temperatur haben. Zwischen den Molekülen des Fluids findet nun ein Energieaustausch statt. Dieser führt dazu, dass sich die Temperatur der

¹ Fluid: strömende Flüssigkeit oder strömendes Gas

² Im Prinzip kann Konvektion auch an der Grenzfläche zwischen zwei Fluiden auftreten.

Fluidmoleküle allmählich der Temperatur der Wand angleichen. Der Bereich in dem diese Anpassung stattfindet ist die Temperaturgrenzschicht.

Die Dicke beider Grenzschichten bestimmt die Größe des Wärmestroms, der übertragen wird. Die Größe des Wärmestroms hängt daher von zahlreichen Faktoren ab:

- Temperaturdifferenz $\Delta T = T_W - T_f$ in K
Je höher die Temperaturdifferenz, desto größer ist die übertragene Wärmemenge.
- Wärmeübertragungsfläche A in m^2
Je größer die Wärmeübertragungsfläche, desto größer ist die übertragene Wärmemenge.
- Art des Fluids
 - Wärmeleitkoeffizient λ_f
 - Dichte ρ
 - Fließfähigkeit, d. h. dynamische Viskosität $\eta \Rightarrow$ Dicke der Geschwindigkeitsgrenzschicht δ
- Strömungsgeschwindigkeit w_f

Die Stoffdaten des Fluids und die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen, die Größe eines Kennwerts, den wir **Wärmeübergangskoeffizient** α nennen. Er wird in der Regel gemessen und ist für die wichtigsten Fälle in Tabellen angegeben. Die Einheit des

Wärmeübergangskoeffizienten ist $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Der Wärmestrom ergibt sich damit zu:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{in} \quad W = \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot m^2 \cdot K \quad (36)$$

Der Wärmewiderstand beträgt:

$$R_W = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad \text{in} \quad \frac{K}{W} = \frac{m^2 \cdot K}{W} \cdot \frac{1}{m^2} \quad (37)$$

Man unterscheidet zwei Formen der Konvektion:

- freie (= natürliche) Konvektion
Die Bewegung der Fluidteilchen wird durch innere Kräfte hervorgerufen. Temperaturunterschiede im Fluid führen zu Dichteunterschieden, diese wiederum versetzen die Teilchen in Bewegung, d. h. es entsteht eine Strömung.

- erzwungene Konvektion

Die Bewegung der Teilchen wird durch äußere Kräfte erzwungen. Das Fluid wird durch Pumpen oder Lüfter angetrieben.

Ändert sich beim Wärmeaustausch zwischen Fluid und fester Wand der Aggregatzustand, d. h. bei Verdampfung oder Verflüssigung, sind die Wärmeübergangskoeffizienten um ein Vielfaches größer als ohne Phasenänderung.

erzwungene Konvektion			
Wasser	600	...	10.000
Gas, Luft, Dampf	10	...	100
freie Konvektion			
Wasser (ruhend)	200	...	800
Gas, Luft, Dampf (ruhend)	3	...	20
Wasser, siedend	1.500	...	20.000
Wasserdampf, kondensierend	2.000	...	100.000

Tab. 6.1 Größenordnung des Wärmeübergangskoeffizienten α für unterschiedliche Bedingungen

Merke

- Der Wärmeübergangskoeffizient ist bei Flüssigkeiten größer als bei Gasen bzw. Dämpfen.
- Der Wärmeübergangskoeffizient ist bei strömenden Stoffen größer als bei ruhenden.
- Der Wärmeübergangskoeffizient ist bei Aggregatzustandsänderungen (Verdampfen, Kondensieren) am größten.

6.2.1 Wärmeübergang bei Verflüssigung

Wenn die Wandtemperatur niedriger ist als die Sättigungstemperatur eines gasförmigen Fluids, z. B. Kältemitteldampf, kommt es zur Verflüssigung. Hierbei finden zwei Vorgänge statt: