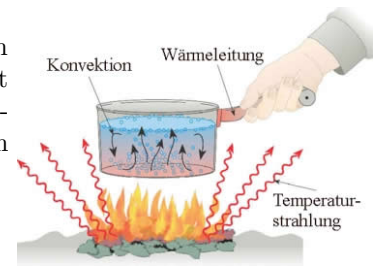


Wärmetransport

Wärmetransport bedeutet, dass innere Energie von einem Ort zum anderen Ort gelangt. Wärmeübertragung kann auf drei Arten erfolgen: zusammen mit der Substanz, in der sie gespeichert ist (Wärmeströmung), durch die Trägersubstanz hindurch (Wärmeleitung) oder ohne eine Trägersubstanz in Form von Strahlung (Wärmestrahlung).



1 Wärmeströmung (Konvektion, Wärmemitführung)

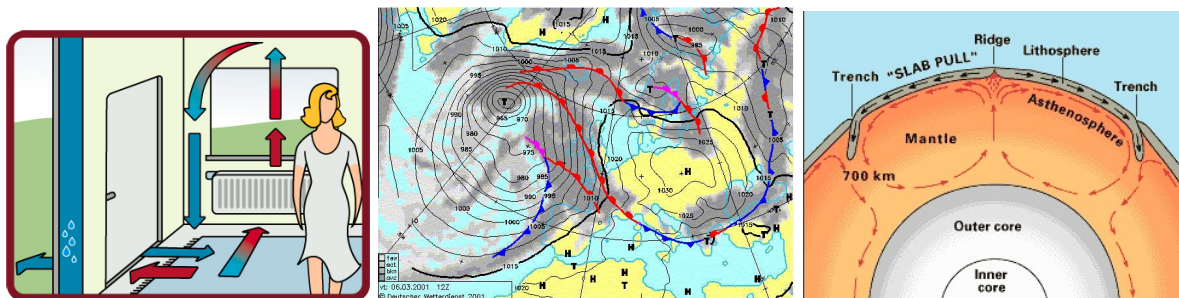
In Flüssigkeiten und Gasen wird die Wärmeenergie häufig durch Umwälzung verteilt. Die Wärme wird mit der Flüssigkeit oder mit dem Gas bewegt.

Ursache

Die Wärmeströmung (oder Konvektion von lat. *convehere* = *mittragen*, *mitnehmen*) können von selber durch temperaturbedingte Dichteunterschiede (wegen Temperaturgradient innerhalb des Mediums und Archimedes Prinzip) oder von aussen durch eine Pumpe verursacht werden. Voraussetzungen sind: gasförmiges oder flüssiges Material, das zirkulieren kann und dabei die Wärme transportiert (mit sich führt).

Beispiele

- Bildung von Hochdruck- oder Tiefdruckgebieten (selbstständige Wärmeströmungen);
- Zentralheizung (jetzt erzwungene Wärmeströmungen);
- Fön (erzwungene Wärmeströmungen);
- Kühlsysteme bei Motoren (erzwungene Wärmeströmungen);
- Seewind und Landwind am See (selbstständige Wärmeströmungen).



Von welchen Materialeigenschaften hängt die Transportrate der Wärmeströmung ab?

1. Die Reibungskraft wirkt bremsend auf jede Wärmeströmung. Die Reibungskraft hängt von der Zähigkeit des Materials ab, also von der **Viskosität**.
Beispiel: schnellere Wärmeströmungen in der Bouillon als in der Tomatensuppe.
2. Der **Temperaturunterschied** bestimmt den Dichteunterschied und damit das Verhältnis von Auftriebskraft zu Gewichtskraft.
Beispiel: Die Thermik ist besonders stark, wenn die Luft am Boden viel wärmer ist als die Luft in grösserer Höhe.

Wie lassen sich Wärmeverluste durch Wärmeströmungen verhindern?

Durch Aufstellen von festen Hindernissen (wie z.B. Wänden, Blendläden) werden Wärmeströmungen einfach blockiert. Beispiel: Gänsehaut!

Wärmeströmungen sind Materieströmungen. Im Vakuum und in Festkörpern gibt es keine Wärmeströmungen.

2 Wärmeleitung

Den Übergang der Wärme von heißen Teilen eines Körpers auf benachbarte kältere Stellen nennt man Wärmeleitung. Bei der Wärmeleitung wird keine Materie bewegt. Dieser Übergang ist materialabhängig: Metalle sind gute, Flüssigkeiten und Gase schlechte Wärmeleiter.

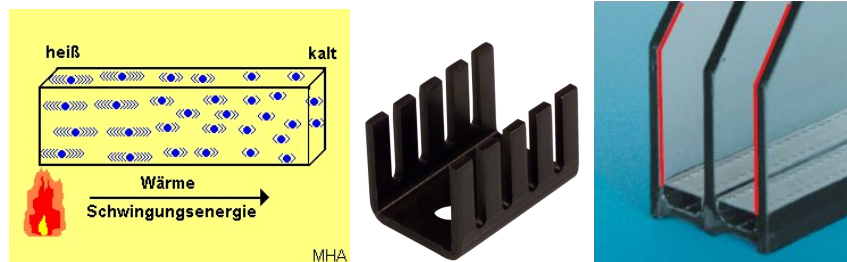
Ursache

Die Atome eines Körpers bewegen sich aufgrund der Temperatur ständig. Durch viele Stöße zwischen Atomen wird so kinetische Energie sukzessive von der heisseren Seite zur kühleren Seite transportiert. Die Wärmeleitung ist in jedem Material und jedem Aggregatzustand möglich. Es wird Energie transportiert, ohne dass dadurch Material transportiert wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums ist null. Ohne Atome keine Stöße zwischen Atomen.

Voraussetzungen sind: guter Kontakt zwischen Wärmequelle und Wärmeempfänger. Beteiligte Materialien müssen gute Wärmeleiter sein.

Beispiele

- Topf auf der Herdplatte, Lötkolben; Bügeleisen; Isolationsmaterial (Fenster und Wärmedämmung beim Bauen).



Wärmeleitgleichung

Herrscht zwischen den beiden Seiten eines Stabs (Dicke d) eine Temperaturdifferenz ΔT , gilt für die Wärmetransportrate P (Wärmemenge ΔQ , die durch die Querschnittsfläche A in der Zeitdauer Δt transportiert wird):

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} = -U \cdot A \cdot \Delta T$$

Die Materialkonstante λ heisst Wärmeleitfähigkeit (FoTa T 171). Seine Einheit ist: $[\lambda] = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$.

Bemerkungen

- Das Minuszeichen deutet an, dass der Wärmefluss von heiss nach kalt verläuft.
- Beim Hausbau wird meistens die Qualität eines Isolators durch seine Wärmedurchgangszahl (U-Wert, vgl. FoTa T. 171) charakterisiert. Für eine einfache homogene Platte gilt es: $U = \lambda/d$ mit $[U] = \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.
- $\Delta T/d$ entspricht den Temperaturgradient im Material.

Beispiel

- Der U-Wert einer typischen Fensterscheibe beträgt $5.6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, während er bei Doppelverglasung auf $2.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ fällt. Mit doppelverglasten Scheiben spart man im Winter beträchtlich Heizenergie!
- Eis ist eine gute Wärmeisolator (Seen gefrieren nur an der Oberfläche).
- Wärmeleitfähigkeit der Luft hängt von der Luftfeuchtigkeit (Sauna).

Wie lassen sich Wärmeverluste durch Wärmeleitung verhindern?

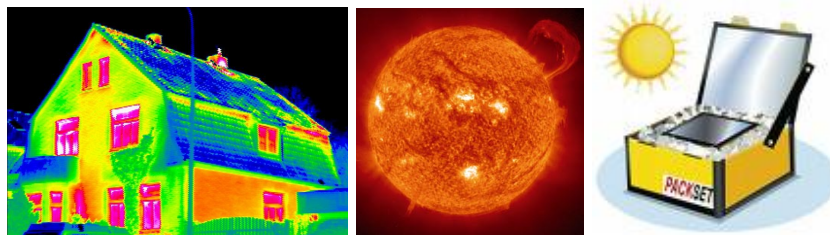
Ein Vakuum bildet einen perfekten Isolator bezüglich Wärmeleitung. Im Alltag setzt man aus praktischen Gründen meistens eine Luftschicht (z.B. Doppelverglasung) oder einen Festkörper mit geringer Wärmeleitfähigkeit mit möglichst viel darin eingeschlossener Luft ein (z.B. Fell, Wollpullover, Glaswolle, Styropor, ...).

3 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung (auch Temperaturstrahlung genannt) ist ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie von einem Ort zu einem anderen, für den kein materieller Träger notwendig ist. Wärmestrahlung besteht (wie das Licht) aus elektromagnetischen Wellen, die jeder Körper abhängig von seiner absoluten Temperatur emittiert.

Beispiele

- Sonne, offenes Feuer, Kerze, Glühlampe, Infrarot-Lampe, Toaster, ...
- Mensch, Tieren, Haus, Erde, ...



Ursache

Die Ursache der auftretenden Wärmestrahlung beruht auf der Eigenschaft, dass der strahlende Körper, bedingt durch die Wärmebewegung seiner Teilchen, eine elektromagnetische Welle erzeugt. Die verschiedenen Formen elektromagnetischer Strahlung unterscheiden sich durch ihre Wellenlänge λ . So hat rotes Licht z.B. eine grössere Wellenlänge als blaues Licht.

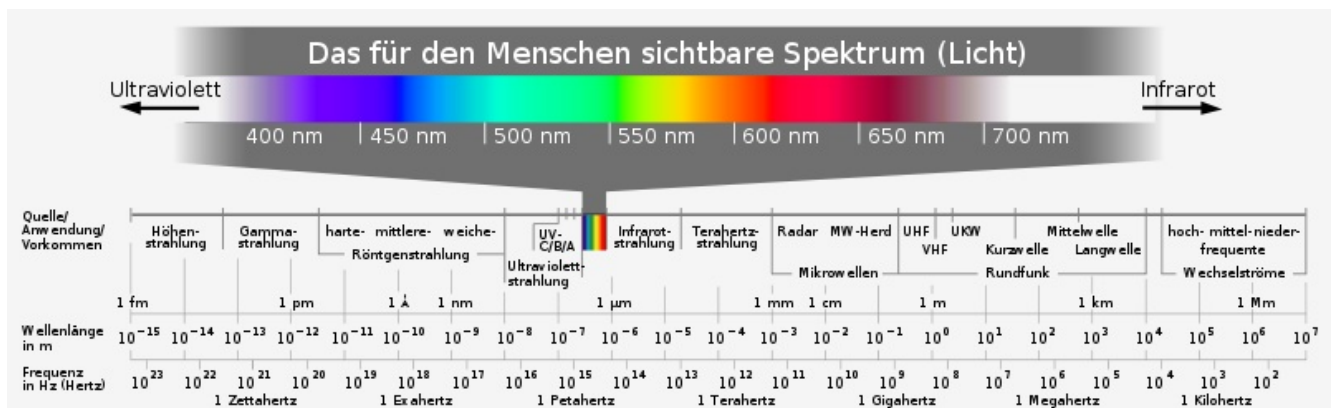


Abbildung 1: Spektrum elektromagnetischer Wellen. Nur ein winzig kleiner Teil des Spektrums (Regenbogen) ist für den Menschen sichtbar.

Jeder Körper gibt Wärmestrahlung ab (Emission) und nimmt aus der Umgebung Temperaturstrahlung auf (Absorption). Je heisser ein Körper ist, umso intensiver ist die vom Körper emittierte Strahlung (vgl. Stefan-Boltzmann-Gesetz) und das Emissionsmaximum verschiebt sich zu kürzeren Wellenlänge (vgl. Wiensches Verschiebungsgesetz). Von der Oberfläche des Körpers werden die elektromagnetischen Wellen geradlinig mit Lichtgeschwindigkeit c (im Vakuum) emittiert. Wärmestrahlung kann sich auch im Vakuum ausbreiten (Beispiel: Sonnenstrahlung durch den luftleeren Weltraum). Wie alle Wellen kann die Wärmestrahlung z.B. an einem Spiegel reflektiert oder mit einer Linse gebündelt werden (Beispiel: Parabolspiegel, verspiegelte Glasschiche in der Thermoskanne).

Absorption, Reflexion und Transmission

Die auf einen Körper treffende Strahlung kann teilweise reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Absorption bewirkt in der Regel eine Erwärmung des Körpers. Wie stark sich ein Körper durch Strahlung aufwärmt, hängt von der Effizienz der Absorption ab. Die Absorptionszahl a ist der Anteil, der absorbiert wird, im Verhältnis zur gesamten Strahlung. Für eine perfekt spiegelnde Oberfläche ist $a = 0$. Nach dem Gesetz von Kirchhoff

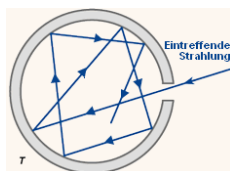
sind Körper mit einem hohen Absorptionszahl gleichzeitig auch Körper mit einer hohen Abstrahlung: Absorptionszahl a = Emissionsvermögen ϵ . Die absorbierte Strahlungsenergie erhöht die innere Energie eines Körpers und damit die Temperatur. Um im thermischen Gleichgewicht zu bleiben, muss daher ein Körper die absorbierte Strahlungsenergie auch wieder emittieren.

Bemerkung Die Erdatmosphäre ist durchsichtig für den sichtbaren Anteil des Sonnenlichts, aber schlecht durchlässig für die Infrarotstrahlung von der Erdoberfläche (Treibhauseffekt).

Schwarze Körper Einen Körper mit Absorptionszahl $a = \epsilon = 1$ bezeichnet man als schwarzen Körper. Ein idealer schwarzer Körper absorbiert Strahlung beliebiger Wellenlänge vollständig bei jeder Temperatur ("perfekter Absorber"). Er reflektiert kein Licht und ist damit schwarz. Für schwarze Körper werden die Gesetze der Wärmestrahlung am einfachsten.

Beispiele

1. Eine Öffnung in einem geschwärzten Hohlraum ist ein gutes Modell für einen schwarzen Körper. Die Strahlung wird vom Hohlraum verschluckt. Beispiel: das Auge (die Pupille ist schwarz).



2. Schwarze Fläche absorbieren sichtbare Strahlung effizienter als weisse und glänzende Fläche. Ein idealer Spiegel reflektiert die Wärmestrahlung vollständig ($a = 0$).
3. Die Sonne ist in guter Näherung ein schwarzer Körper, ebenso der menschliche Körper!

Strahlungsintensität

Die Stärke der Wärmestrahlung wird durch die Strahlungsintensität J (auch Bestrahlungsstärke genannt) beschrieben. Sie gibt an, welche Strahlungsleistung P in einem bestimmten Abstand vom Strahler auf eine der Strahlung senkrecht ausgesetzte Fläche A_{\perp} trifft. Die Wärmeleistung ist gleich der vom Strahler pro Zeiteinheit auf diese Fläche freigesetzten Wärmemenge ΔQ :

$$J = \frac{P}{A_{\perp}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A_{\perp}}$$

Die Einheit der Strahlungsintensität ist: $[J] = \frac{W}{m^2} = \frac{J}{s \cdot m^2}$.

Beispiele

- Die Wärmestrahlung eines Körpers breitet sich in alle Richtungen gleichmässig aus und verteilt sich auf eine Kugelfläche. Die Strahlungsintensität im Abstand r ist dann: $J = P/4\pi r^2 \propto 1/r^2$.
- Die Sonne verursacht auf der Erdbahn (senkrechter Einfall, ausserhalb der Atmosphäre) die Strahlungsintensität (Solarkonstante, auch E_0 oder S genannt): $J_S = 1.38 \text{ kW/m}^2$.

Gesetz von Stefan-Boltzmann

Die Intensität der Wärmestrahlung J_S eines schwarzen Körpers hängt erstaunlicherweise nur von seiner absolute Oberflächentemperatur T und dem Absorptionsvermögen a ab. Die Strahlungsintensität J eines schwarzen Körpers ist proportional zur **vierten** Potenz der absoluten Temperatur T (in Kelvin!) und zur Stefan-Boltzmann Konstante σ :

$$J = \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Der schwarze Körper wird bei hohen Temperaturen wird "heller". Aus der Solarkonstante kann man die Temperatur der Sonne berechnen (5778 K).

Planck'sches Strahlungsgesetz

Wie sich die Strahlungsintensität auf die Wellenlängenbereiche verteilt, das beschreibt das Spektrum der Strahlung ($I - \lambda$). Das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung ist breitbandig und kontinuierlich. Es wurde von Max Planck berechnet. Je höher die Temperatur eines schwarzen Körpers ist, umso intensiver gibt er bei einer bestimmten Wellenlänge Energie ab.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{h \cdot c / (k_B \cdot T \cdot \lambda)} - 1}$$

Dabei ist h die Planck'sche Konstante, k_B Boltzmann-Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit.

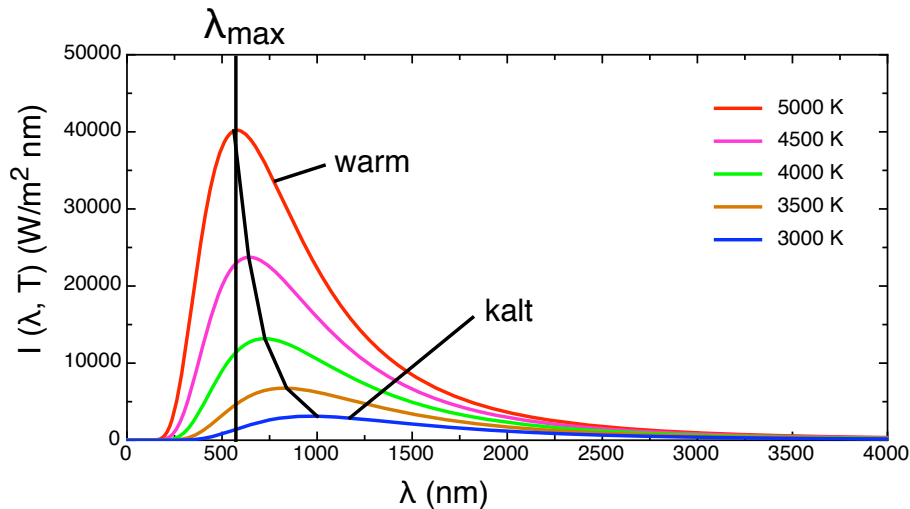


Abbildung 2: Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen (spektrale Strahlungsdichte pro Wellenlängeneinheit vs. Wellenlänge). Die Fläche unter der Kurve entspricht die gesamte Strahlungsintensität J . Das Maximum der Strahlung liegt beim λ_{max} und verschiebt sich bei höheren Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen.

Wien'sches Verschiebungsgesetz

Es gibt ein Maximum, das mit steigender Temperatur T zu kürzeren Wellenlänge wandert. Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums kann mit dem Wien'sche Verschiebungsgesetz berechnet werden:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

mit λ_{max} die Wellenlänge der maximale abgestrahlte Intensität, T die absolute Temperatur in Kelvin und mit der Wien-Konstanten $b = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$

Menschen strahlen am meisten Wärme bei $\lambda_{max} = 10 \mu\text{m}$ (IR) ab, die Sonne bei 502 nm (grün).