

Skripte zur Physik  
Wärmelehre

von  
Christian Wyss



Skripte zur Physik  
Wärmelehre

von

Christian Wyss



mathema



© 2024 Dr. Christian Wyss

Verlagslabel: mathema ([www.mathema.ch](http://www.mathema.ch))

ISBN   Hardcover: 978-3-384-20446-2  
Paperback: 978-3-384-20445-5

Auflage 1.2

Druck und Distribution im Auftrag des Autors:  
tredition GmbH, Heinz-Beusen-Stieg 5, 22926 Ahrensburg, Germany

Das Werk, einschliesslich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Für die Inhalte ist der Autor verantwortlich. Jede Verwertung ist ohne seine Zustimmung unzulässig. Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen, insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäss §44b UrhG („Text und Data Mining“) zu gewinnen, ist untersagt. Die Quellen der Bilder und deren Lizenzen sind im Anhang aufgeführt. Die Publikation und Verbreitung erfolgen im Auftrag des Autors, zu erreichen unter:

Dr. Christian Wyss, Chemin du Clos 60, 2502 Biel-Bienne, Schweiz.

Die Philosophie steht in diesem grossen Buch geschrieben, das unserem Blick ständig offen liegt – ich meine das Universum –; aber das Buch ist nicht zu verstehen, wenn man nicht zuvor die Sprache erlernt und sich mit den Buchstaben vertraut gemacht hat, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und deren Buchstaben sind Kreise, Dreiecke und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Bild davon zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth herum.

Galileo Galilei: „*Il Saggiatore*“ (1623)



## **Inhaltsverzeichnis**

*Einleitende Worte*

*Zu den Inhalten der Skripte*

- I. Einführung in die Wärmelehre
- II. Fortgeschrittene Wärmelehre
- III. Klimaphysik

*Ergänzende Bemerkungen*

*Demonstrationsexperimente*

*Schlussworte*



# Einleitende Worte

Die Skripte zur Physik sind im Rahmen des gymnasialen Unterrichts entstanden und sind primär als **unterrichtsbegleitendes Material** konzipiert. Sie können jedoch auch als eigenständiges Lern- und Übungsmaterial eingesetzt werden.

Die Skripte enthalten **Lückentexte**. Sie dienen der Festigung des erworbenen Wissens und sollten im Plenum mit der gesamten Klasse ausgefüllt werden. Diese handschriftlichen Einträge helfen, die Schlüsselbegriffe und Aussagen zu verinnerlichen und Herleitungen und Beweise besser nachzuvollziehen.

## Zu den Inhalten

### *Einführung in die Wärmelehre*

#### *Behandelte Inhalte*

Der erste Teil dieser Einführung in die Wärmelehre thematisiert die Grösse Temperatur und ihre Verbindung zur inneren Energie. Anschliessend wird die Wärme und der Wärmetransport diskutiert und es wird die Veränderung der inneren Energie durch Wärmezufuhr untersucht (Wärmekapazität sowie Schmelz- und Verdampfungswärme). Die Energieumwandlung aufgrund des ersten und zweiten Hauptsatzes wird erörtert.

Dieses Skript ist eine erste Einführung in die Thematik, wobei der Stoff eher intuitiv als streng formal behandelt wird. Besonderes Augenmerk liegt auf der Unterscheidung von Wärme und Temperatur sowie auf den Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Energieumwandlung.

#### *Notwendiges Vorwissen*

Dieses Skript setzt voraus, dass die Grundlagen der klassischen Mechanik bekannt sind, insbesondere die verschiedenen Energieformen wie kinetische und potentielle Energie.

### *Fortgeschrittene Wärmelehre*

#### *Behandelte Inhalte*

Dieses Skript ergänzt, präzisiert und erweitert den Stoff, der im Skript „Einführung in die Wärmelehre“ behandelt wird. Insbesondere werden Themen wie die thermische Ausdehnung von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen sowie die Zustandsgleichung des idealen Gases (einschliesslich ihrer Spezialfälle, also die Gesetze von Boyle-Mariotte, von Gay-Lussac und von Amontons) detailliert behandelt und aus der kinetischen Gastheorie hergeleitet. Des Weiteren werden Kreisprozesse diskutiert und die Hauptsätze erläutert. Abschliessend wird eine kurze Einführung in die statistische Physik gegeben.

#### *Notwendiges Vorwissen*

Vorausgesetzt wird, dass zuvor die „Einführung in die Wärmelehre“ behandelt wurde und den Studierenden die Grundlagen der klassischen Mechanik bekannt sind. Insbesondere wird erwartet, dass die Studierenden die Konzepte von Kraft, Impuls und (kinetischer und potenzieller) Energie verstehen. Um nicht von den physikalischen Kernaussagen abzulenken, ist das Skript bewusst mathematisch auf einem recht einfach zugänglichen Niveau gehalten. Dennoch sind grundlegende

Kenntnisse in Algebra notwendig. Für einige wenige Herleitungen wird jedoch die Fähigkeit zu integrieren vorausgesetzt. Für die Einführung in die statistische Physik sollte die Binomialverteilung bekannt sein.

## ***Klimaphysik***

### ***Behandelte Inhalte***

Im ersten Teil wird ein einfaches Klimamodell der Erde aufgestellt: absorbierte und emittierte Strahlung der Erde sind im thermodynamischen Gleichgewicht identisch. Anschliessend werden sukzessive weitere Faktoren ins Modell integriert, darunter der Emissionsgrad und Absorptionsgrad der Erde wie auch der Treibhauseffekt. Im nächsten Schritt werden die Ursachen des anthropogenen Klimawandels behandelt und unterschiedliche Szenarien der zukünftigen Klimaerwärmung diskutiert.

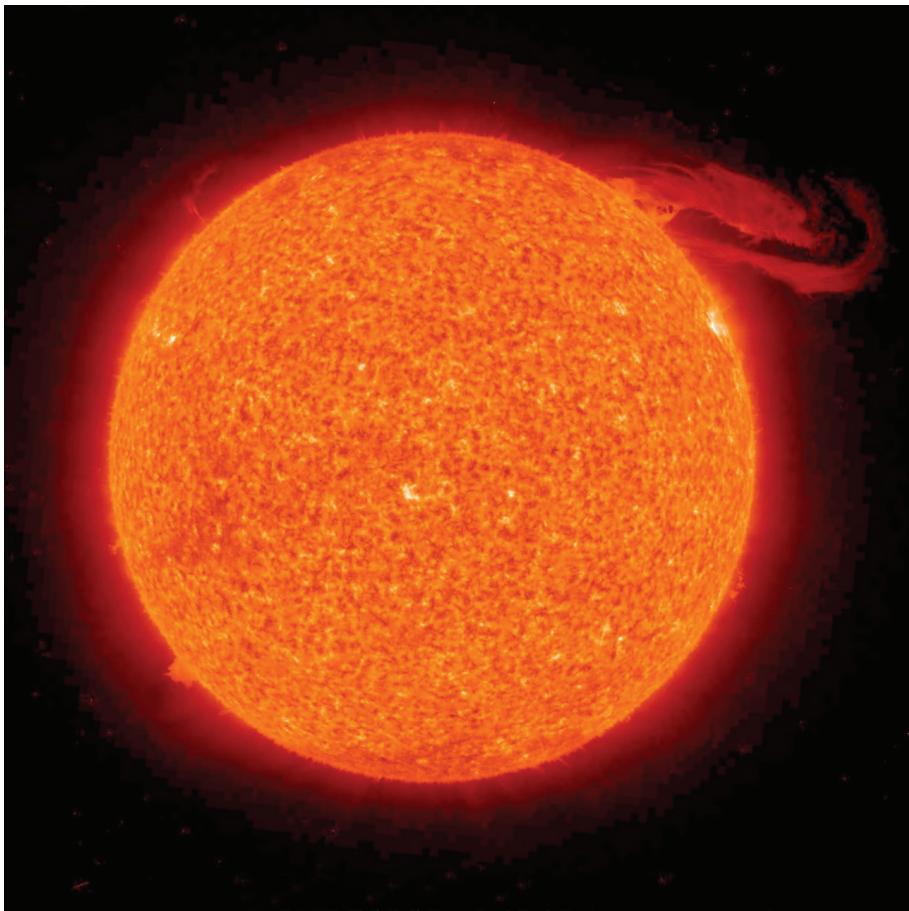
### ***Notwendiges Vorwissen***

Die Konzepte von Energie und Leistung müssen bekannt sein. Es ist ausserdem von Vorteil, wenn das Stefan-Boltzmann-Gesetz bekannt ist, jedoch wird die erforderliche Information auch im Skript selbst kurz resümiert. Es wird vorausgesetzt, dass die Studierenden die Fähigkeit haben, einfache Gleichungen zu lösen.





# Einführung in die Wärmelehre



Die Sonne, unser zentraler Stern im Sonnensystem, hat eine Oberflächentemperatur von  $6'000^{\circ}\text{C}$ . Die Sonne ist für das Leben auf der Erde von fundamentaler Bedeutung. Viele wichtige Prozesse auf der Erdoberfläche wie das Klima und das Leben selbst werden durch die Strahlungswärme der Sonne angetrieben. Bei schönem Wetter erhält jeder Quadratmeter jede Sekunde 1'361 Joule Wärme von der Sonne.

# 1. Die Temperatur

## Die Messung der Temperatur

### Temperaturrempfindung

Wir Menschen können mit der Haut grob zwischen heiss,

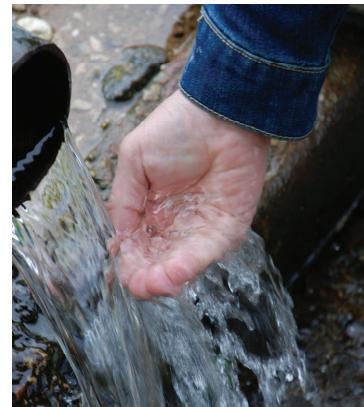
... Warm .... und ... kalt .... unterscheiden. Wir

verfügen also über einen Temperatursinn...,

dieser hat nur eine sehr grobe Einteilung und lässt sich

leicht täuschen. Wir benötigen also ein Messegerät für die

Temperatur – ein ..... Thermometer..... .



Warm oder kalt?

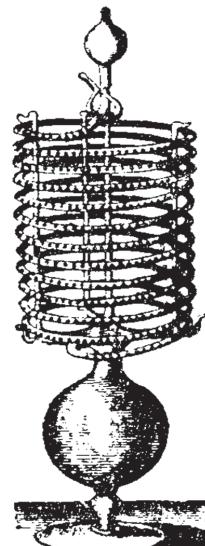
### Erste Thermometer

Die ersten Thermometer stammen aus dem 17. Jahrhundert (Barock). Das unten abgebildete Thermometer stammt aus dieser Zeit. Unten im Hohlraum wurde Alkohol eingefüllt. Dehnt sich die Flüssigkeit durch Erwärmung aus, so steigt sie in dem spiralförmig aufgewickelten dünnen Rohr auf. Wenn die Thermometer verschieden dicke Steigrohre oder unterschiedlich geteilte Skalen hatten, konnten die Messungen der einzelnen Thermometer nicht miteinander verglichen werden.

Diese Thermometer hatten noch keine Skalen mit Zahlenwerten, sondern unterschieden grob in Temperaturstufen, die in Worten unterschieden wurden: „magnus frigidus“ (grosse Kälte), „aer frigidus“ (kalte Luft), „aer subfrigidus“ (etwas kalte Luft), „aer temperatus“ (milde Luft), „aer subcalidus“ (etwas heisse Luft), „aer calidus“ (heisse Luft) und „magnus calor“ (grosse Hitze).

Gesucht wurde also eine Vorschrift, wie die Temperatur in vergleichbaren Zahlenwerten gemessen werden kann – eine ... Eichung..... für die Temperaturmessung. Viele Thermometer basieren auf der

... Ausdehnung..... von Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern oder nutzen von der Temperatur abhängige ... elektrische..... Effekte.



Фиг. 3.

Aufgabe 1: Viele Leute in Amerika tragen bei 32 Grad im Schatten einen warmen Mantel.

Weshalb ist dies so?

## Eichung nach Rømer

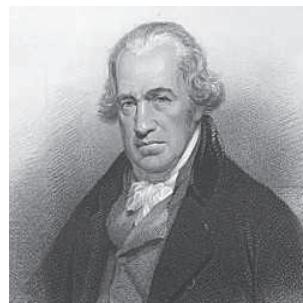
Ole Rømer baute das erste Thermometer mit zwei Fixpunkten. Seine äusserst vorteilhafte Idee war es, die Thermometerskalen durch die Höhen der Flüssigkeitssäulen bei zwei Fixpunkten zu markieren: der Schmelztemperatur einer wässerigen Salzlösung und der Siedetemperatur von Wasser.



Ole Christensen Rømer  
\*1644 Århus, †1710 Kopenhagen

## Fahrenheit-Skala

Fahrenheit baute seine Thermometer in der heute noch üblichen Form und füllte einige mit Quecksilber, andere mit Alkohol. Offenbar angeregt durch einen Besuch bei Ole Rømer in den Jahren 1708 und 1709, suchte er nach Temperaturfixpunkten für seine Messskala. Als einen Fixpunkt und als Nullpunkt seiner Thermometerskala wählte er die Temperatur einer Mischung aus Eis, Wasser und Salmiak oder Salz; diese Temperatur soll auch die tiefste Temperatur des bitterkalten Winters von 1709 gewesen sein. Fahrenheit hoffte, durch diese Wahl negative Temperaturen vermeiden zu können. Als zweiter Fixpunkt diente ihm vermutlich die menschliche Körpertemperatur. Fahrenheit markierte die Höhe der Flüssigkeitssäule bei diesen beiden Fixpunkten, dann teilte er den Abstand zwischen den Markierungen in 64 gleiche Teile. Die Schmelztemperatur des Eises betrug auf seiner Skala 32°F und die Siedetemperatur des Wassers 212°F.



Daniel Gabriel Fahrenheit  
\*1686 Danzig, † 1736 Den Haag

## Celsius-Skala

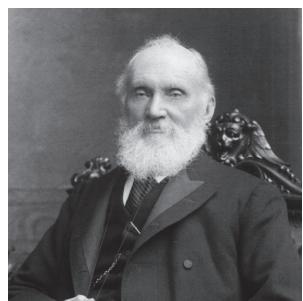
Der Schwede Anders Celsius hatte um 1740 die Idee, die Temperaturen anhand einer Skala zu messen, die sich am Gefrier- und Siedetemperatur des Wassers orientiert. Den „Abstand“ der beiden Zustände unterteilte er in 100 Grade und revolutionierte damit die bis dahin übliche Fahrenheit-Skala. Allerdings betrug bei Celsius die Siedetemperatur des Wassers 0°C und die Schmelztemperatur von Eis 100°C. Erst später wurde die Skala umgedreht.



Anders Celsius  
\*1701 Uppsala, † 1744 ebenda

## Kelvin-Skala

Der Physiker W. Thomson, später zu Lord Kelvin geadelt, schlug eine Temperaturskala vor, die sich am absoluten Nullpunkt orientiert. Man hatte unterdessen herausgefunden, dass es nicht beliebig tiefe Temperaturen gibt, sondern dass keine Temperaturen unter  $-273.15^{\circ}\text{C}$  erreicht werden können. Bei der Kelvin-Skala ist diese tiefste Temperatur der Nullpunkt. Die Kelvin-Skala hat die gleiche Schrittweite wie die Celsiusskala.



William Thomson (Lord Kelvin)  
\*1824 Belfast, †1907 Schottland

Aufgabe 2: Welcher Nullpunkt wurde für diese Skalen verwendet?

Rømer  $0^\circ\text{Rø}$  = .....

Fahrenheit  $0^\circ\text{F}$  = .....

Celsius  $0^\circ\text{C_U}$  = ..... (ursprünglich)

Celsius  $0^\circ\text{C}$  = ..... (heute)

Kelvin  $0\text{ K}$  = .....

Aufgabe 3: Gib nun die Schmelztemperatur von Eis und die Siedetemperatur des Wassers in Fahrenheit, Celsius und Kelvin an?

Schmelztemperatur von Eis = .....

Siedetemperatur von Wasser = .....

### Notation und Umrechnung

Wir schreiben die Temperatur mit diesen Zeichen und Einheiten:

    Kelvin      Celsius      Fahrenheit

Zeichen:       $\text{K}$        $^\circ\text{C}$        $^\circ\text{F}$

Einheit:       $\text{K}$        $^\circ\text{C}$        $^\circ\text{F}$

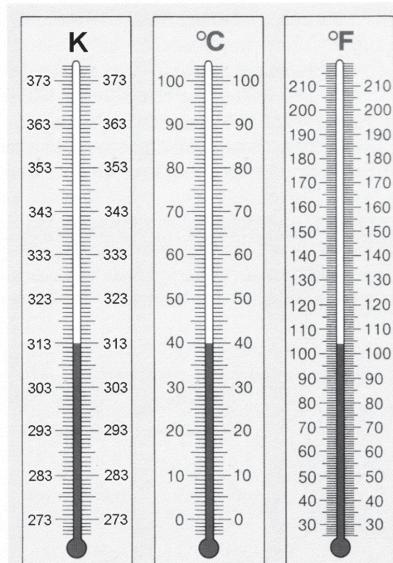
Beispiel:       $273,15$        $0^\circ\text{C}$        $32^\circ\text{F}$

Aufgabe 4: Erstelle eine Umrechnungsformel für die Umrechnungen

a) von Celsius in Kelvin und zurück und

b) von Celsius in Fahrenheit und zurück.

Die Resultate aus Aufgabe 3 und auch das nebenstehende Bild helfen Dir dabei.



Celsius  $\vartheta_C \leftrightarrow$  Kelvin  $T$

$$T = \vartheta_C + 273,15$$

$$\vartheta_C = T - 273,15$$

Celsius  $\vartheta_C \leftrightarrow$  Fahrenheit  $\vartheta_F$

$$\vartheta_C = \frac{5}{9} (\vartheta_F - 32)$$

$$\vartheta_F = \frac{9}{5} \vartheta_C + 32$$

Aufgabe 5: Fahrenheit eichte seine Skala anhand seiner Körpertemperatur. Wie hoch war seine Körpertemperatur offenbar? Gib diese Temperatur in Grad Celsius  $^\circ\text{C}$  und in Kelvin  $\text{K}$  an.

Aufgabe 6:  $0^\circ\text{F}$  soll die tiefste Temperatur des bitterkalten Winters von 1709 gewesen sein. Gib diese Temperatur in Grad Celsius  $^\circ\text{C}$  und in Kelvin  $\text{K}$  an.

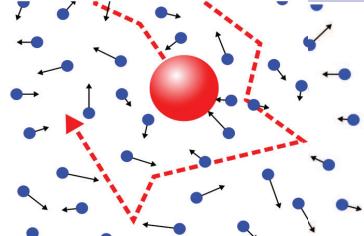
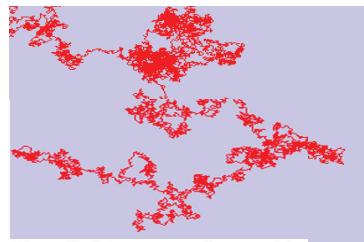
Aufgabe 7: Gibt es eine Temperatur, bei der ein Celsius-Thermometer den gleichen Wert anzeigt wie ein Fahrenheit-Thermometer? Wenn ja, um welche Temperatur handelt es sich?

## Thermische Bewegung und innere Energie

Materie besteht aus sehr kleinen Teilchen, den Atomen und Molekülen.

Die Teilchen befinden sich in einer ständigen, ungeordneten und thermischen Bewegung.

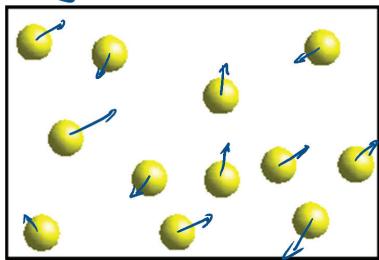
Die bewegten Atome und Moleküle besitzen kinetische Energie. Addiert man die Energie aller Teilchen, so erhält man die innere Energie  $U$ .



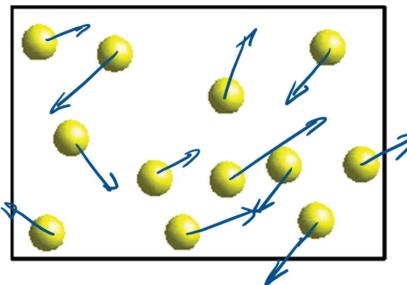
Der schottische Botaniker Robert Brown entdeckte 1827, dass einzelne Blütenpollen unter dem Mikroskop Zitterbewegungen ausführen – die Brown'sche Bewegung.

Die Temperatur des Materials bestimmt die thermische Bewegung der Teilchen im Material:

kalte Materie (niedrige Temperatur):  
langsame thermische Bewegung



heisse Materie (hohe Temperatur):  
schwelle thermische Bewegung



Je höher die Temperatur, desto schweller ist die thermische Bewegung der Atome bzw. Moleküle. Je höher die Temperatur, desto grösser die innere Energie. Die Temperatur misst also die innere Energie. Sie beschreibt einen Zustand eines Systems.

Die Moleküle in der Luft (bei 20°C) haben im Durchschnitt eine Geschwindigkeit von 1'500 km/h. Am absoluten Nullpunkt (-273.15°C) ... erliegt die thermische Bewegung der Teilchen.

Aufgabe 8: In einem Gefäß befindet sich 1 mol Neon bei 20°C. Die Neon-Atome haben im Mittel eine kinetische Energie von  $6 \cdot 10^{-21}$  J.

- Wie viele Neon-Atome hat es im Gefäß?
- Welche Masse hat das Gas im Gefäß und welche Masse in Gramm hat ein Neon-Atom?
- Welche mittlere Geschwindigkeit hat ein Neon-Atom?
- Welche innere Energie hat das Gas?

## Aggregatzustände

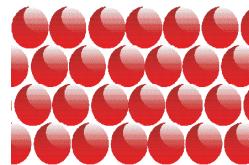
Je nach Temperatur kann sich ein Material in einem grundsätzlich anderen Zustand befinden.

Wir unterscheiden drei verschiedene solche Aggregatzustände.

fest.....

(z.B. Eis.....)

In diesem Zustand behält ein Stoff im Allgemeinen sowohl Form als auch Volumen bei. Die kleinsten Teilchen bewegen sich in einem Feststoff nur von ihrem Ort weg. Sie schwingen um eine feste Position im Kristallgitter.



flüssig.....

(z.B. Wasser.....)

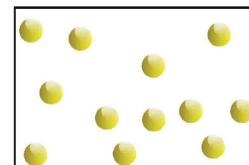
Im flüssigen Zustand wird das Volumen des Materials beibehalten, aber die Form ist unbeständig und passt sich dem umgebenden Raum an. Die Teilchen sind nicht ortsfest, sondern können sich verschieben.



gasförmig.....

(z.B. Dampf.....)

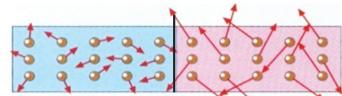
In diesem Zustand entfällt auch die Volumenbeständigkeit. Das Gas verändert Volumen und Form und füllt den zur Verfügung stehenden Raum vollständig aus. Bei Stoffen im gasförmigen Zustand sind die Teilchen in schneller Bewegung.



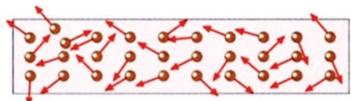
## 2. Die Wärme

Berühren sich zwei Materialien mit unterschiedlicher Temperatur, so gleicht sich die Temperatur an.

Das heisse Material kühlt sich ab, seine innere Energie wird kleiner und das kühle Material erwärmst sich, seine innere Energie nimmt zu.



Wärme(energie) fliesst vom heissen System (rechts) zum kalten System (links).



bis beide Systeme dieselbe Temperatur haben und keine Wärme mehr fliesst.

Die aufgrund der Temperatur differenz übertragene Energie heisst

Wärme  $Q$   $[Q] = \text{J}$

Die Wärme beschreibt einen Prozess.

Aufgabe 9: Was ist der Unterschied zwischen „warm“ und „Wärme“?

Aufgabe 10: In der Physik wird der Begriff „Kälte“ nicht verwendet. Weshalb nicht?

Aufgabe 11: Ein abgeschlossenes (d.h. isoliertes) System tauscht keine Energie mit seiner Umgebung aus. Die beiden abgebildeten Systeme sind beide optimiert. Eines ist möglichst isoliert, beim anderen soll möglichst viel Wärme fliessen. Welches ist das isolierte System?



### 3. Wärmetransport

Wärme kann grundsätzlich auf drei verschiedene Arten transportiert werden:

Steht ein heißer Körper in direktem Kontakt mit einem kalten Körper, so wird die thermische Bewegung von den schnellen an die langsamen Teilchen durch Stöße weitergegeben und so Wärme transportiert: Wir sprechen von

#### Wärmeleitung

In Gasen und Flüssigkeiten kann sich die Materie bewegen. Durch die Durchmischung der Materie wird auch die Wärme transportiert. Dieser Wärmetransport heißt

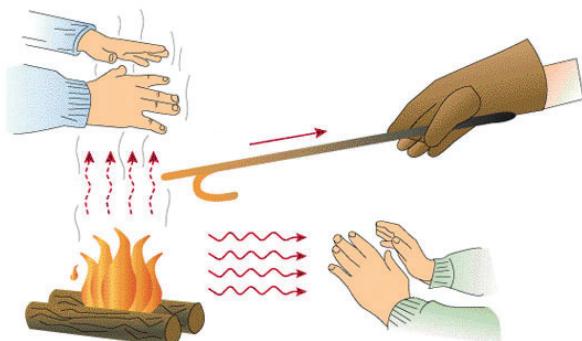
#### Konvektion

Die Sonne steht nicht in direktem Kontakt mit der Erde, und dennoch kann die Wärme von der Sonne zur Erde transportiert werden. Auch durch Strahlung kann Wärme übertragen werden. Der Wärmefluss durch elektromagnetische Strahlung nennen wir

#### Wärmestrahlung

**Aufgabe 12:** An einem Lagerfeuer kommen alle drei Formen der Wärmeleitung vor. Zeichne sie ein.

**Aufgabe 13:** Welche Transportarten werden mit Fensterscheiben erschwert?



**Aufgabe 14:** Welcher Wärmetransport ist bei den abgebildeten Phänomenen am wichtigsten?

